



Titre: Conception et prototypage d'un capteur lidar 3D pour la robotique
Title: mobile

Auteur: Tom Lamarche
Author:

Date: 2009

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Lamarche, T. (2009). Conception et prototypage d'un capteur lidar 3D pour la
Citation: robotique mobile [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/8220/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie:
PolyPublie URL: <https://publications.polymtl.ca/8220/>

**Directeurs de
recherche:**
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CONCEPTION ET PROTOTYPAGE D'UN CAPTEUR LIDAR 3D POUR LA
ROBOTIQUE MOBILE

TOM LAMARCHE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
JANVIER 2009



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-48924-6

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-48924-6

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

CONCEPTION ET PROTOTYPAGE D'UN CAPTEUR LIDAR 3D POUR LA
ROBOTIQUE MOBILE

présenté par: LAMARCHE Tom

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. GOURDEAU Richard, Ph.D., président

M. DESANTIS Romano M., Ph.D., membre et directeur de recherche

M. DUPUIS Érick, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. HURTEAU Richard, D.Ing., membre

à Monsieur Triangle.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont supporté de près ou de loin au cours de ce projet. Tout d'abord mes confrères de travail à l'Agence spatiale canadienne, en particulier: Érick Dupuis pour les conseils ainsi que la co-direction et la correction de ce mémoire; Sébastien Gemme pour le support et les bons conseils informatiques en tout genre; l'équipe de l'atelier de fabrication mécanique, toujours serviable et professionnelle; l'ensemble de mes comparses du groupe de robotique et finalement l'Agence spatiale canadienne pour le support financier.

Merci à Romano M. De Santis, directeur de ce mémoire, pour sa compréhension, sa patience et son support.

Une bonne pensée pour la musique et tous les complices qui à ce jour ont bien voulu nager avec moi à travers elle, source infaillible de réconfort moral.

Merci aux membres de ma famille, particulièrement mes parents Normand et Nicole parce qu'au fond tout a commencé par eux. Merci finalement à ma copine Josée qui m'a enduré pendant les multiples heures dédiées de près ou de loin à mes études au cours des années qui viennent de passer.

RÉSUMÉ

Au cours de la dernière décennie, les idées relatives à l'exploration planétaire ont connu un regain de popularité, la lune et Mars étant généralement les destinations en tête d'affiche. À cause des conditions environnementales hostiles de l'espace, peu favorables à toutes formes de vie, le recours à la robotique mobile pour exécuter et supporter l'exploration planétaire s'avère un choix tout indiqué. Avec l'éloignement viennent toutefois les délais de communication qui rendent rapidement la téléopération d'un véhicule robotique à partir de la terre difficile, voir presque impossible. On se retrouve alors invariablement avec un robot qui ne peut qu'évoluer lentement, limitant le champ d'action possible. Sous de telles conditions, la capacité de naviguer de façon autonome sur de longues distances devient essentielle si l'on désire améliorer le rayon d'action d'un robot mobile.

Selon l'approche de navigation autonome prise par l'Agence spatiale canadienne (ASC) dans le cadre de ses recherches en robotique mobile pour l'exploration planétaire, un robot doit en premier lieu pouvoir détecter et analyser la topographie de son environnement. Afin de remplir cette tâche, ce projet propose un capteur de vision active de type lidar qui permet de percevoir directement ce qui l'entoure en trois dimensions. Le capteur développé:

- offre une couverture complète de l'environnement, soit un champ de vision horizontal de 360° et vertical de 180°.
- possède une résolution angulaire suffisante à identifier les obstacles, avec une précision sur les distances mesurées de l'ordre du centimètre.
- permet des mesures d'une distance allant jusqu'à 32 mètres dans sa configuration nominale. Une reconfiguration de quelques paramètres procurerait une plage maximale de 80 mètres, en contre-partie d'une résolution réduite.

- est simple et abordable, du fait qu'il utilise presque exclusivement des composants disponibles commercialement. L'instrument principal de mesure est un SICK LMS200, un télémètre laser commun qui a depuis longtemps fait ses preuves, tant en milieu industriel que dans diverses applications de robotique mobile.
- peut aisément être intégré à toute plate-forme mobile; les seules connexions requises sont l'alimentation et un lien de communication Ethernet standard (TCP-IP).

Le micro-contrôleur au centre de l'architecture matérielle du capteur agit comme un serveur TCP-IP. Du côté du traitement des données, le logiciel développé pour s'interfacer avec l'architecture logicielle de navigation autonome procure en un premier temps un client TCP-IP. Celui-ci se connecte au capteur via un lien Ethernet standard et obtient ainsi les points 3D acquis par le capteur. Le logiciel traite ensuite les données pour reproduire en mémoire le terrain balayé sous forme d'un maillage triangulaire. Après quelques manipulations pour filtrer les triangles indésirables du maillage, ce dernier peut être décimé et transféré aux algorithmes de navigation autonome qui utiliseront l'information reçue à des fins de localisation et planification de trajectoires.

Le capteur a été intégré à la plate-forme mobile MRT, une plate-forme P2-AT de la compagnie ActivMedia Robotics, modifiée par l'ASC pour mieux répondre aux besoins de la recherche. Au cours des saisons estivales de tests 2007 et 2008, le capteur a ainsi été testé et utilisé en continu avec succès dans le cadre des recherches en navigation autonome. Ces tests ont majoritairement été exécutés sur le terrain martien, une aire aménagée à l'ASC pour émuler diverses topologies typiques de l'environnement martien.

ABSTRACT

Over the last decade, the space community brought its spotlight back to planetary exploration concepts, Moon and Mars being considered with prime interest. Because of the harsh conditions found in space, generally forbidding life presence, sending mobile robots to conduct space exploration tasks is the ideal option in many cases. With distance though, important communication delays arise. These delays quickly make teleoperation from Earth very difficult, if not impossible. Robots are then condemned to maneuver very slowly for their own safety, greatly reducing their usefulness. Under such circumstances, the ability to navigate autonomously over long distances becomes essential to enhancing mobile robots capabilities.

The Canadian Space Agency (CSA) approach to autonomous navigation, as part of its ongoing research in mobile robotics for planetary exploration, first requires a robot to be able to sense and analyze the topography of its environment. To fulfill this duty, this work proposes a 3D lidar type active vision sensor to directly sense its surroundings. The designed sensor:

- provides a full coverage of the environment, that is 360°horizontal field of view with 180°vertical field of view.
- has an angular resolution fine enough to detect obstacles with a centimeter order precision over measured distances.
- allows sensing up to 32 meters in its nominal range configuration. Reconfiguring some parameters can extend this range to 80 meters, trading off with reduced resolution.
- is simple and affordable, being mostly built from commercial off-the-shelf components. The measuring instrument is a SICK LMS200 laser range sensor. This sensor has an extensive heritage in industrial as well as mobile robotics applications.

- can easily be integrated to most mobile platforms; the only required connections are power and a standard Ethernet (TCP-IP) communication link.

The micro-controller synchronizing the hardware also acts as a TCP-IP server. The developed software on the client console connects to it through a standard Ethernet link to get the measured 3D points. The software then processes the data to recreate the scanned terrain surface as an irregular triangular mesh. Unwanted triangles are filtered from the mesh, which can then be transferred to CSA's autonomous navigation algorithms where it will be decimated and used for localization and trajectory planning.

The sensor has been installed on the MRT mobile robot, an ActivMedia Robotics P2-AT platform modified by CSA for its research purposes. During the 2007 and 2008 summer test seasons, the sensor was successfully tested and used continuously as part of CSA's research on autonomous navigation schemes. Most tests were conducted at the CSA marsyard, an area that emulates some typical martian environment topologies.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES	xvii
LISTE DES ANNEXES	xix
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DES TECHNOLOGIES EXISTANTES	4
1.1 Types de capteurs utilisés en robotiques mobile	4
1.1.1 Optiques	4
1.1.1.1 Lidars	5
1.1.1.2 Triangulation active	8
1.1.1.3 Caméras stéréo	9
1.1.1.4 Flash Lidar	10
1.1.2 Ultrasons	11
1.1.3 Radars	11
1.2 Principes des capteurs lidar	12

1.2.1	Mesures par temps de vol	13
1.2.1.1	Pulsée	13
1.2.1.2	Différence de phase	14
1.2.1.3	Détection de cohérence	15
1.2.2	Mesure par triangulation	15
CHAPITRE 2	DÉFINITION DES OBJECTIFS DE PERFORMANCE . . .	17
2.1	Scénario d'opération typique	17
2.1.1	Navigation autonome	17
2.1.2	Environnement expérimental	19
2.2	Représentation par maillage triangulaire	20
2.3	Objectif global	23
2.4	Objectifs spécifiques	24
CHAPITRE 3	CONCEPTION MATÉRIELLE	26
3.1	Télémètre laser	26
3.2	Plate-forme rotative	28
3.3	Micro-contrôleur	32
3.4	Alimentation	34
3.5	Interconnexions électriques	35
3.6	Capteur FCL assemblé	36
CHAPITRE 4	ARCHITECTURE LOGICIELLE	38
4.1	Contrôle embarqué bas niveau	38
4.1.1	Protocole de communication	42
4.2	Traitement des données	44
4.2.1	Filtrage du robot	45
4.2.2	Génération du maillage	46
4.2.3	Couture	50

4.2.4	Remplissage sous le capteur	50
4.2.5	Filtrage des triangles indésirables	53
4.2.6	Conversion en coordonnées cartésiennes	59
4.3	Traitement logiciel subséquent	61
CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET ANALYSES		63
5.1	Exemples de balayages	63
5.1.1	Balayage d'une scène connue	69
5.2	Performances	69
5.2.1	Répétabilité	69
5.2.2	Vitesse d'acquisition	75
5.2.3	Consommation	76
5.2.4	Masse	77
5.2.5	Précision	77
5.2.6	Coûts	78
5.2.7	Sommaire des avantages et limitations	79
5.3	Problèmes rencontrés	83
CONCLUSION		86
RÉFÉRENCES		90
ANNEXES		99

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Caractéristiques techniques du LMS200 (SICK, 2006)	29
Tableau 3.2	Spécifications de la plate-forme rotative RM-3 de Newmark . .	29
Tableau 3.3	Spécifications du RCM3720	35
Tableau 4.1	Paramètres de balayage, données de la figure 4.4	42
Tableau 5.1	Comparaison de deux balayages d'une même scène intérieure .	75
Tableau 5.2	Comparaison des paramètres de balayages à résolution normale et élevée	75
Tableau 5.3	Répartition de la masse parmi les composants	77
Tableau 5.4	Répartition des coûts parmi les composants (\$ CAN)	79

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Types de couverture des capteurs lidars	6
Figure 1.2	Principe de mesure pulsée par temps de vol	13
Figure 1.3	Principe de mesure par différence de phase	14
Figure 1.4	Principe de mesure par triangulation	16
Figure 2.1	Flot du procédé de navigation autonome	18
Figure 2.2	MRT, configuration de 2006, avec lidar Iliris-3D	20
Figure 2.3	Terrain de Mars de l'ASC	21
Figure 2.4	Carte d'élévation numérique du terrain de Mars de l'ASC (résolution = 20 cm)	22
Figure 3.1	Vue d'ensemble des composants du capteur	26
Figure 3.2	Télémètre laser LMS200 de SICK	27
Figure 3.3	Pattern de balayage du LMS200	28
Figure 3.4	Plate-forme rotative RM-3, de Newmark Systems inc.	30
Figure 3.5	Définition des paramètres pour le moment d'inertie	31
Figure 3.6	Moteur SM1720D85D de Animatics	33
Figure 3.7	Assemblage du moteur et de la plate-forme rotative	33
Figure 3.8	Micro-contrôleur Rabbit RCM3720	34
Figure 3.9	Assemblage du micro-contrôleur	34
Figure 3.10	Schéma de la distribution des alimentations	36
Figure 3.11	Capteur FCL assemblé, vue de face et d'arrière	37
Figure 3.12	Assemblage final du FCL sur le robot mobile MRT	37
Figure 4.1	Diagramme de flot de données de l'architecture logicielle	39
Figure 4.2	Architecture des liens de communication	39
Figure 4.3	Machine à états finis embarquée du FCL	41
Figure 4.4	Exemple de nuage de points généré par le FCL	42
Figure 4.5	Définition du format des trames	43

Figure 4.6	Définition des coordonnées sphériques utilisées	44
Figure 4.7	Définition des polarités des coordonnées sphériques	45
Figure 4.8	Référentiel cartésien du FCL	46
Figure 4.9	Triangulation de Delaunay, critère du cercle vide	47
Figure 4.10	Maillage avec l'algorithme Delaunay 2D (gauche) vs 3D (droite)	48
Figure 4.11	Couture d'un maillage	51
Figure 4.12	Angle mort sous le robot	52
Figure 4.13	Algorithme de remplissage sous le robot	53
Figure 4.14	Résultat du remplissage	54
Figure 4.15	Les discontinuités qui produisent les ombres	54
Figure 4.16	Exemple de triangles d'ombre	55
Figure 4.17	Les triangles de frontière dans les bordures concaves	55
Figure 4.18	Exemple de triangles de frontière	56
Figure 4.19	Distances minimum et maximum des sommets d'un triangle . .	57
Figure 4.20	Seuil minimum sur l'angle d'incidence	59
Figure 4.21	Représentation du décalage entre le point de mesure et l'axe de pivot	60
Figure 4.22	Conversion des coordonnées sphériques en cartésien	61
Figure 5.1	MRT muni du FCL sur le terrain de Mars de l'ASC	63
Figure 5.2	Localisation des balayages sur le terrain de Mars de l'ASC . . .	63
Figure 5.3	Balayage de la plaine (position A)	64
Figure 5.4	Balayage de la falaise (position B)	65
Figure 5.5	Balayage de l'entrée du canyon (position C)	66
Figure 5.6	Balayage de la région des cratères (position D)	67
Figure 5.7	Vues rapprochées de maillages, représentation en fil de fer . . .	68
Figure 5.8	Acquisition d'une scène connue	70
Figure 5.9	Recalage des données maillées sur le modèle 3D d'une scène connue	71

Figure 5.10	Points extraits, devant de la boîte	72
Figure 5.11	Plan moyen (X, Y, Z en mètres)	72
Figure 5.12	Distribution des distances des points par rapport au plan moyen	73
Figure 5.13	Balayage en laboratoire	74
Figure 5.14	Répartition des points au sol selon la hauteur du capteur	81
Figure 5.15	Points ambivalents	83

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

Abréviations

AM-CW:	Amplitude Modulation-Continuous Wave
ASC:	Agence spatiale canadienne
DEM:	Digital Elevation Map
E/S:	Entrées/Sorties
ESA:	European Space Agency
FCL:	Full Coverage LIDAR
FM-CW:	Frequency Modulation-Continuous Wave
GPR:	Ground Penetrating Radar
H.R.:	Humidité relative
LCS:	Laser Camera System
LIDAR:	Light Detection And Ranging
LSB:	Least Significant Byte (Octet le moins significatif)
MER:	Mars Exploration Rover
MRT:	Mobile Robotic Testbed
MSB:	Most Significant Byte (Octet le plus significatif)
MSL:	Mars Science Laboratory
NASA:	National Aeronautics and Space Administration
RADAR:	RAdio Detection And Ranging
TOF:	Time-Of-Flight
μC :	Micro-contrôleur

Paramètres

m	Masse, en kg
a	Dimension, en m

b	Dimension, en m
α	Accélération angulaire, en rad/s^2
β	Angle d'incidence
τ	Couple, en Nm
θ	Coordonnée du capteur en azimuth; correspond à l'orientation de la plate-forme rotative
ϕ	Coordonnée du capteur en élévation; correspond à l'angle de mesure du télémètre laser
r	Distance allant de l'origine du capteur jusqu'au point mesuré.
T_{ratio}	Seuil sur le ratio
T_{angle}	Seuil sur l'angle d'incidence
$T_{perimetre}$	Seuil sur le périmètre
D	Facteur de décalage

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I	SCHÉMAS D'INTERCONNEXIONS	99
----------	-------------------------------------	----

INTRODUCTION

L'idée de voir l'humanité explorer ou même habiter d'autres planètes ne date pas d'hier, elle a bercé l'imagination de plusieurs générations déjà. Depuis Jules Verne au 19^e siècle, on arriverait difficilement à dénombrer le nombre d'oeuvres incorporant un tel concept. Avec la course vers l'espace des années '60 et '70, nous avons vu les russes et les américains poser au total 18 engins spatiaux (Wikipedia, 2007) sur la Lune, dont six étaient habités dans le cadre du programme Apollo. À la même époque, plusieurs sondes ont été envoyées vers les autres planètes terrestres. Parmi celles qui ont alors connu du succès on dénombre Venera 3 à 16 et Mariner 2 et 5 (Vénus), Mariner 10 (Mercure) ainsi que Mariner 4 et Viking 1 et 2 (Mars). Une vague de sondes interstellaires fût aussi lancée au fil des années '70 avec Pioneer 10, Pioneer 11, Voyager 1 et Voyager 2. Bien que les années '80 et '90 aient vu une diminution marquée de l'exploration planétaire, des succès de la dernière décennie comme Mars Pathfinder, les deux MER (Mars Exploration Rovers) et Cassini-Huygens ont contribué à ramener les idées d'exploration planétaire à l'avant-plan des missions spatiales. Plusieurs nations s'orientent aujourd'hui pour un retour sur la lune, souvent considérée comme un tremplin vers Mars. Toutefois, atteindre un autre corps céleste, s'y poser et l'explorer est encore loin d'être trivial. On le réalise rapidement lorsqu'on constate qu'à ce jour, environ les deux tiers des missions spatiales envoyées vers notre voisine Mars se sont soldées par des échecs. Les défis techniques, économiques et politiques, ainsi que les risques inhérents à l'environnement hostile qu'est l'espace garantissent un rôle de choix à la robotique mobile, une solution toute indiquée pour l'exploration planétaire.

De par les délais de communication importants (environ 8 à 40 minutes entre la Terre et Mars) et le temps de contact limité par les fenêtres de communication, la télé-opération de robots dans de tels contextes devient très laborieuse. Les prochaines missions robotiques d'exploration planétaire seront vraisemblablement MSL ("Mars Science Labora-

tory") de la NASA (Volpe, 2005) et ExoMars de l'ESA (Vago, 2004). Toutes deux visent à poser un robot mobile sur Mars, robot qui aura régulièrement à parcourir des distances de l'ordre du kilomètre à chaque jour. Ceci implique que ces robots devront nécessairement naviguer au-delà de l'horizon de leurs capteurs. Impossible donc de spécifier les cibles à atteindre à partir d'images panoramiques reçues, comme c'était le cas pour Pathfinder et les MER. Avec les délais de communication, de telles opérations seraient beaucoup trop longues à exécuter. Les futures missions exigeront ainsi des robots capables de naviguer par eux-mêmes de façon autonome sur de plus longues distances.

Dans cette optique, les travaux de recherche en exploration planétaire en cours à l'Agence spatiale canadienne (ASC) se concentrent principalement sur le développement d'une architecture de navigation autonome. L'approche utilisée implique en tout premier lieu la capacité pour un robot de détecter et d'interpréter son environnement. Pour ce faire, la technologie de vision active de type lidar (*Light Detection And Ranging*) offre des perspectives fort intéressantes. Malheureusement à l'heure actuelle, bien qu'un certain nombre de capteurs de type lidar soient disponibles sur le marché, ceux-ci restent relativement peu adaptés aux contraintes des recherches concernées. C'est donc dans le but de répondre à cette lacune que le projet présenté ici aborde la conception et le développement d'un capteur de vision active de type lidar, capable de percevoir l'environnement en trois dimensions. Les travaux englobent le développement matériel du capteur, basé principalement sur l'intégration de composants disponibles commercialement, ainsi que le développement des interfaces logicielles qui permettent d'utiliser le capteur et de faire le traitement initial des données acquises.

Ce mémoire compte cinq chapitres. Le premier chapitre offre une brève revue des types de capteurs disponibles et typiquement utilisés en robotique mobile pour détecter l'environnement à des fins de navigation. Il aborde ensuite les technologies que l'on retrouve dans les capteurs lasers commerciaux. Le second chapitre présente quant à lui l'infrastructure courante de recherche à l'ASC relativement à l'exploration planétaire.

Ceci permet de cerner le contexte dans lequel s'inscrit le travail présent pour ensuite définir les objectifs poursuivis, à savoir la mise au point d'un capteur lidar 3D. Aux troisième et quatrième chapitres, les aspects matériels et logiciels de la conception et du prototypage du capteur développé sont respectivement présentés. Finalement, le cinquième chapitre fait état des résultats et performances obtenues à ce jour.

CHAPITRE 1

REVUE DES TECHNOLOGIES EXISTANTES

Nous débutons par une brève revue des types de capteurs disponibles. Nous approfondissons ensuite les capteurs laser, la technologie qui se démarque comme la plus appropriée à notre application.

1.1 Types de capteurs utilisés en robotiques mobile

Cette section présente un court survol des divers type de capteurs qui peuvent être utilisés en robotique mobile pour détecter l'environnement sur des plages d'au moins quelques mètres et permettre la construction de modèles 3D de ces environnements. Les capteurs de proximité qui servent habituellement à détecter/prévenir les collisions à très courte distance (quelques centimètres) sont donc exclus. Les avantages et inconvénients des différents types de capteurs par rapport à l'application qui nous concerne sont soulignés, justifiant ultimement le recours à la technologie lidar.

1.1.1 Optiques

Les capteurs basés sur des principes de mesure optiques représentent probablement la famille la plus étendue de capteurs qui puisse être utilisés par un robot pour cartographier son environnement. (Hebert, 2000) en fait un bon tour d'horizon. Plusieurs type de capteurs optiques existent:

1.1.1.1 Lidars

Alors que l'utilisation de la technologie lidar ("LIght Detection And Ranging") pour mesurer divers paramètres atmosphériques remonte aux années 1930 (Weitkamp, 2005), le présent contexte se limite à l'utilisation du lidar comme instrument d'imagerie active pour mesurer des distances. Le principe général consiste à émettre un signal laser et d'interpréter la réflexion de celui-ci pour mesurer la distance qui nous sépare de l'obstacle visé.

Les capteurs lidar offrent une grande précision, typiquement de l'ordre de quelques millimètres, et de grandes portées, allant de quelques mètres à quelques centaines de mètres. Ils sont insensibles aux conditions d'éclairage, pouvant même être utilisés en pleine obscurité. Dépendamment de la technologie utilisée, ils permettent de relever habituellement de 1000 à 100000 points par seconde. Comme les mesures prises reflètent directement des points dans l'espace tri-dimensionnel, la puissance de calcul nécessaire à leur interprétation est minime. En contre-partie, les nombreux composants optiques, électroniques et mécaniques qui les composent font généralement de ces capteurs des instruments d'une taille et d'un poids importants comparativement à d'autres technologies comme les ultrasons et les caméras video.

Du point de vue couverture, trois types de capteurs lidar existent sur le marché. Ils peuvent être définis selon le nombre d'axes de mesure qu'ils procurent, soit 1D, 2D ou 3D. Les capteurs 1D représentent des dispositifs où un laser fixe est utilisé, permettant de mesurer la distance entre le capteur et l'obstacle où il pointe. Dans les modèles 2D, un miroir rotatif permet au laser de balayer l'horizon dans un plan. Les capteurs 3D, pour leur part, disposent de deux axes de balayage, couvrant ainsi un volume. La figure 1.1 schématise les couvertures de ces trois types de capteurs.

Les télémètres 1D sont d'un intérêt limité pour la reconstruction d'un environnement en

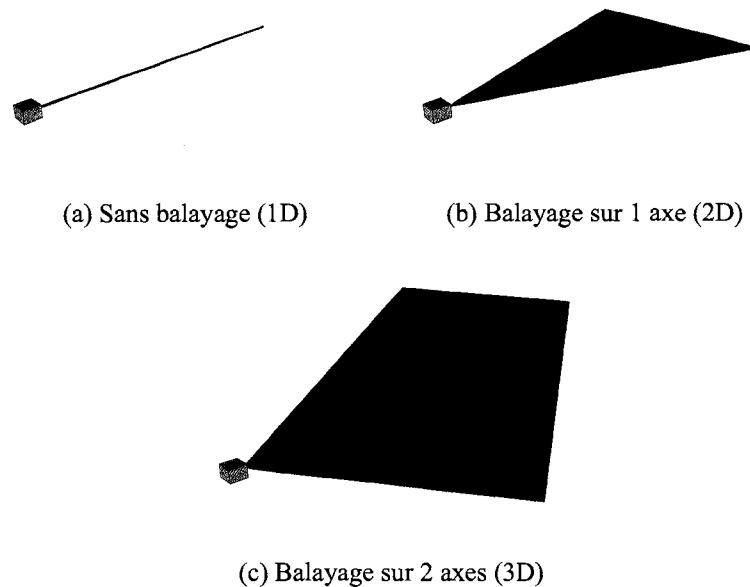


Figure 1.1: Types de couverture des capteurs lidars

trois dimensions. Les capteurs 2D et 3D, bien que plus complexes et potentiellement moins robustes de par leurs pièces mobiles, sont beaucoup plus utiles. Ceux-ci sont de plus en plus l'option *de facto* pour les applications robotiques qui désirent cartographier leur environnement. Les capteurs 2D, beaucoup plus abordables, sont depuis longtemps très populaires au sein de la communauté qui oeuvre en robotique mobile. Sick est probablement le fabricant de télémètres 2D le mieux établi. Ses LMS200 et LMS291 ont une longue feuille de route et sont extrêmement populaires. Hokuyo est aussi de plus en plus populaire, offrant surtout des capteurs de moindre portée mais plus petit et léger.

Il est commun de rencontrer des systèmes robotiques mobiles ayant recours à un ou plusieurs lidars 2D fixes pour percevoir et reconstruire l'environnement qui les entoure, comme par exemple (Thrun et al., 2006), (Urmson et al., 2006), (Gerbaud, 2004) et (Weingarten et al., 2004). L'acquisition se fait alors en continu, et le déplacement

du véhicule permet de construire la carte de l'environnement au fur et à mesure que le véhicule se déplace. Cette méthode est très simple d'un point de vue matériel. En contre-partie, il faut connaître en tout temps la position précise du capteur afin de pouvoir assembler les balayages successifs entre eux. Ceci demande évidemment de bien connaître la position du véhicule. Or, obtenir une odométrie suffisamment fiable à cet égard n'est souvent pas une question triviale, surtout en environnement extérieur non-structuré. Les équipes qui optent pour cette option doivent invariablement adresser ce problème. Une autre limitation provient du fait que le robot doit se déplacer pour cartographier son environnement. S'il se trouve à l'arrêt, il ne balaie alors qu'une seule et même ligne et n'a donc qu'une perception très limitée de ce qui l'entoure.

Les lidars 3D permettent même à l'arrêt de balayer un volume, une solution idéale pour cartographier un environnement en trois dimensions. Un des deux robots K10 de la NASA Ames Research Center transporte un Ilris3D de la compagnie Optech pour remplir cette fonction (Fong et al., 2008). Une équipe de Carnegie Mellon University a quant à elle intégré au printemps 2008 un capteur TriDAR développé par Neptec Design Group à son robot Scarab. Plusieurs véhicules inscrits au *DARPA Urban Challenge 2007* ont eu recours au tout récent HDL-64E fabriqué par Velodyne Acoustics. Faro Technologies, Leica Geosystems, 3rdTech, Riegler, Trimble, Maptek I-Site, Zoller+Fröhlich et Spatial Integrated Systems sont d'autres manufacturiers qui offrent des capteurs lidar 3D. (POB, 2007) présente une étude comparative des télémètres 3D qui étaient sur le marché en 2007. Tous ces capteurs, bien que performants et puissants, sont malheureusement dans bien des cas trop dispendieux, lourds et énergivores pour pouvoir être aisément intégrés sur un robot mobile, à moins que ce dernier soit d'une taille significative. Une alternative populaire consiste à utiliser un lidar 2D plus modeste sur un mécanisme pouvant le faire pivoter. Le second axe de balayage nécessaire à l'obtention d'un lidar 3D est alors obtenu. (Nüchter et al., 2005), (Surmann et al., 2001), (Broten and Collier, 2006) et (Fortin, 2006) sont quelques exemples où un télémètre balayant à l'horizontale a

été muni d'un axe de pivot vertical. (Nüchter et al., 2005), (Brenneke et al., 2003) et (Wagner, 2006) sont des exemples où le capteur est installé pour balayer à la verticale sur un pivot horizontal. (Lamon et al., 2006) et (Wagner, 2007) présentent une variation sur la configuration avec pivot horizontal où deux télémètres sont installés dos-à-dos, permettant un balayage complet de la scène en un demi tour de pivot, au lieu d'un tour complet.

1.1.1.2 Triangulation active

Les systèmes à triangulation active utilisent une caméra vidéo pour capter la projection d'un motif lumineux connu, généralement produit par un laser, sur la surface à mesurer. Des algorithmes de traitement d'image sont utilisés pour isoler le motif dans l'image et de là, connaissant les paramètres de la caméra et du motif projeté, déduire la distribution de celui-ci dans l'espace tri-dimensionnel. Plusieurs dizaines de produits sont disponibles sur le marché. Konica Minolta, Leica Geosystems, Steinbichler, Faro, Perceptron et Romer ne sont que quelques exemples de manufacturiers qui offrent de tels produits. Ceux-ci offrent une très haute précision, souvent de l'ordre de la fraction du millimètre. Ils ciblent généralement les applications d'inspection et d'ingénierie inverse, typiquement en environnement structuré et contrôlé. (Mirallès, 2007) présente un système qui vise l'inspection de barrages et structures de béton immergées. Ce cas présente une situation plus difficile qu'un environnement manufacturier contrôlé, bien que le système s'inscrive toujours dans des conditions d'opération relativement structurées. L'applicabilité des systèmes à triangulation active reste pour l'instant limitée en environnement non-structuré où les conditions d'éclairage varient. De plus, puisque la résolution dépend principalement de la distance de séparation entre la caméra et le projecteur et qu'elle décroît rapidement avec la distance, leur plage d'opération dépasse rarement 1 ou 2 mètres. Les capteurs de ce type disponibles sur le marché ne sont donc pas adaptés à des applications de robotique mobile.

1.1.1.3 Caméras stéréo

L'utilisation de deux caméras passives côte-à-côte permet aussi par triangulation de reconstruire une scène en trois dimensions. Au lieu d'avoir recours à une source de lumière connue comme dans le cas de la triangulation active, des algorithmes établissent plutôt la correspondance entre les pixels des deux images captées simultanément. Les systèmes stéréo passifs représentent un domaine de recherche très étendu et probablement un des plus ancien en ce qui a trait à la vision assistée par ordinateur. Les caméras vidéo sont petites, légères, relativement peu dispendieuses et consomment peu d'énergie, ce qui favorise leur intégration aux systèmes robotiques. En contre-partie, l'interprétation des données acquises par les caméras exige un traitement logiciel élaboré pour en extraire l'information recherchée. L'amélioration importante qu'a connu la puissance de calcul des ordinateurs au cours des 20 dernières années rend aujourd'hui possible l'exécution d'un tel traitement en temps réel ou presque. Point Grey Research est un exemple de compagnie qui offre des modules de caméra stéréo complet (matériel et logiciel). L'énumération de tous les systèmes ayant recours aux caméras stéréo serait difficile tant il en existe. Dans le domaine de la robotique spatiale, mentionnons les célèbres Mars Pathfinder ainsi que les deux MER Spirit et Opportunity qui utilisent l'imagerie stéréo pour naviguer (Matijevic and Shirley, 1997), (Volpe, 2005), (Goldberg et al., 2002).

Malgré leurs nombreux avantages, les caméras stéréo trainent avec elles plusieurs limitations. D'abord, la connaissance des paramètres optiques du système est essentielle pour obtenir une bonne précision. Une méthode de calibrage précise est donc nécessaire. Ensuite, puisqu'elles sont passives, la performance des caméras et des algorithmes reste encore plus sensible que les systèmes actifs aux conditions d'éclairage. Ceci peut rapidement rendre de tels capteurs inutilisables lorsque ces conditions deviennent difficiles, ce qui est souvent le cas en environnement extérieur. Comme les systèmes actifs, les contraintes géométriques de la triangulation imposent un compromis entre la distance

de séparation des caméras, la plage de portée et la résolution. Le niveau de bruit sur les mesures, à la base non-négligeable, augmente aussi rapidement avec la distance. Finalement, la précision sur les profondeurs mesurées et la portée se situent bien en deçà de ce que l'on peut obtenir avec des capteurs de type lidar.

1.1.1.4 Flash Lidar

La présence de mécanismes de balayage dans les lidars 2D et 3D constitue la source majeure de leurs limitations. Ceux-ci imposent des contraintes sur les vitesses d'acquisition possibles et rendent les appareils lourds et volumineux. Une technologie qui pourrait éventuellement remédier à ces limitations est celle du "flash lidar". Le principe consiste à moduler un signal laser infrarouge qui couvre entièrement la scène que l'on désire détecter. Une série de détecteurs, un peu comme le capteur CCD d'une caméra vidéo, mesure simultanément l'ensemble du signal lumineux réfléchi par la scène. Un tableau de profondeur, dont chaque élément représente un point dans l'espace tri-dimensionnel, peut ainsi être obtenu presque instantanément et ce à quelques dizaines de Hertz. En plus d'une rapidité accrue, ces capteurs dépourvus de pièces mobiles sont compacts et légers. Cette technologie ne date pas d'hier comme en témoignent (Anthes et al., 1993) et (Idan and Yahav, 1994). Néanmoins, très peu de ces capteurs ont commercialement vu le jour. Mesa Imaging est probablement la compagnie la plus en vue dans le domaine avec ses caméras *SwissRanger*. (Oggier et al., 2004) présente le début de cette série. Leur caméra a évolué de là vers le modèle SR-3000 qui sera bientôt remplacé par le SR-4000 (annoncé pour 2009).

Cette technologie est considérée prometteuse depuis longtemps, mais elle conserve à ce jour des limites importantes qui réduisent son applicabilité en robotique mobile. D'une part, la plage de ces capteurs n'excède pas l'ordre du 5 à 10 m. La résolution de ces caméras devient insuffisante à plus longue distance (SR-3000: 176×144 pixels pour un

champs de vision de $47.5^\circ \times 39.6^\circ$). Aussi, le bruit sur les lectures est plus élevé que sur un lidar typique. Finalement, leur utilisation à l'extérieur résulte généralement en de piètres performances à cause d'une sensibilité accrue aux conditions d'éclairage. Une amélioration suffisante de la technologie pourrait par contre à moyen ou long terme rendre celle-ci plus intéressante et abordable que la technologie lidar standard.

1.1.2 Ultrasons

Un peu comme le font les chauve-souris, on peut détecter des obstacles en émettant des ondes ultrasoniques, desquelles on mesure le temps de retour. Les capteurs à ultrasons sont habituellement économiques et offrent des plages de détection allant jusqu'à quelques mètres. Ils sont toutefois peu précis et en absence d'atmosphère, ils ne peuvent évidemment pas fonctionner. Si l'on envisage une application spatiale, ces capteurs ne sont donc d'aucun secours.

1.1.3 Radars

Les capteurs radar détectent l'environnement en émettant des ondes radio, mesurant ensuite les échos de celles-ci. La relativement grande longueur d'onde des radars résulte en une portée élevée. De plus, les radars "traversent" la poussière, la pluie, le brouillard, la neige et sont insensibles aux conditions d'éclairage. En contre-partie, la divergence typique des faisceaux radar et l'existence inévitable de lobes latéraux limite la résolution possible pour ces types de capteurs. Un exemple d'utilisation de la technologie radar pour le guidage d'un véhicule autonome se retrouve sur les véhicules Sandstorm et Highlander de l'équipe Red Team de Carnegie Mellon (Mellon, 2008), deux véhicules qui ont complété avec succès le DARPA Grand Challenge.

L'interprétation des données d'un radar à courte portée n'est pas triviale, tel qu'exposé

par (Foessel, 2002). L'émission de lobes latéraux, les patrons d'émission qui varient et la distribution du bruit sont des exemples de phénomènes qui doivent être modélisés adéquatement si l'on désire retirer de l'information utile des données acquises. Bien que possédant des avantages importants, la résolution faible comparé à la technologie lidar, le coût élevé et la disponibilité commerciale réduite de la technologie radar pour des applications de robotique mobile ne motive pas à l'heure actuelle cette option pour notre application.

Bien que celle-ci ne s'applique pas directement à la navigation autonome, mentionnons que (Fong et al., 2008) est un exemple d'une utilisation intéressante de la technologie radar. On y présente entre autre un robot K10 de la NASA Ames Research Center qui utilise un radar capable de pénétrer le sol pour établir la cartographie sous-terrainne. Cette technologie n'est pas particulièrement intéressante pour la navigation comme telle. D'un point de vue scientifique toutefois, le GPR ("*Ground Penetrating Radar*") peut constituer un outil précieux.

1.2 Principes des capteurs lidar

Principalement à cause de leur précision, leur grande portée et leur insensibilité aux conditions d'éclairage, les capteurs lidar s'avèrent l'option de choix pour cartographier en trois dimensions l'environnement d'un robot mobile. Le principe de fonctionnement d'un lidar n'est pas unique. Bien que tous les lidars mesurent les distances à l'aide d'un faisceau laser, différentes techniques existent.

1.2.1 Mesures par temps de vol

1.2.1.1 Pulsée

La mesure pulsée par temps de vol consiste à émettre des impulsions laser et à mesurer ensuite le temps que met chaque impulsion pour atteindre la surface visée et revenir au capteur. Les impulsions voyageant à vitesse constante (vitesse de la lumière), la distance entre le capteur et la cible visée est directement proportionnelle au temps mesuré. La figure 1.2 schématise ce principe de mesure.

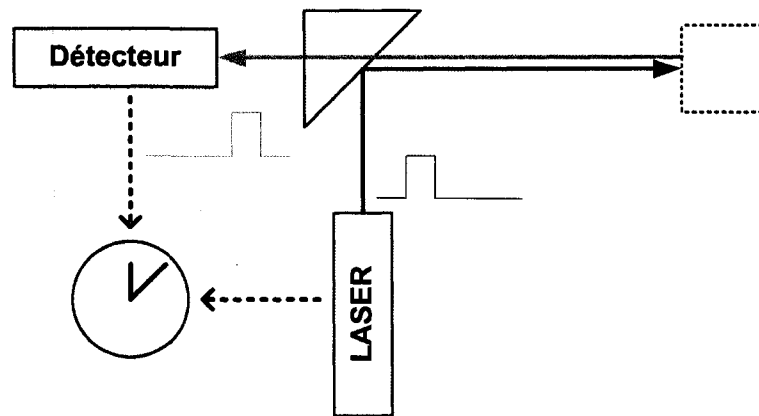


Figure 1.2: Principe de mesure pulsée par temps de vol

Bien que techniquement les deux techniques suivantes soient aussi des mesures par temps de vol (TOF, "*Time Of Flight*"), l'expression "mesure par temps de vol" est souvent considérée comme synonyme de mesure pulsée. Les capteurs de ce type peuvent offrir des portées considérables, allant même au-delà du kilomètre. Comme la précision sur les distances mesurées dépend de la précision avec laquelle le capteur est capable de calculer le temps écoulé entre l'envoi de l'impulsion et son retour, cette précision reste la même peu importe la distance à laquelle se trouve l'obstacle.

1.2.1.2 Différence de phase

La littérature réfère parfois à ce principe sous le nom “AM-CW” pour “*Amplitude Modulation-Continuous Wave*”. Au lieu de mesurer le temps écoulé entre l’émission et la réception d’une impulsion laser, le capteur mesure plutôt le déphasage entre l’émission et le retour d’une source laser continue modulée en amplitude à haute fréquence (MHz). Ce processus permet généralement d’effectuer des mesures beaucoup plus rapidement que la mesure pulsée par temps de vol classique, tout en offrant une précision accrue (typiquement de l’ordre du millimètre). Toutefois, le problème d’ambiguïté inhérent à ce principe impose une limite de distance équivalente à la demi-longueur d’onde de la modulation. De plus, la précision de cette méthode décroît plus rapidement avec la distance qu’avec la méthode pulsée (Hebert, 2000). Cette technique est aussi un peu plus sensible aux conditions d’éclairage que la mesure pulsée. Conséquemment, la portée des capteurs ayant recours à la mesure par différence de phase atteint au plus les 50 ou 100 mètres.

Les flash lidars comme ceux produits par Mesa Imaging (Oggier et al., 2004) ont aussi recours à la mesure par différence de phase.

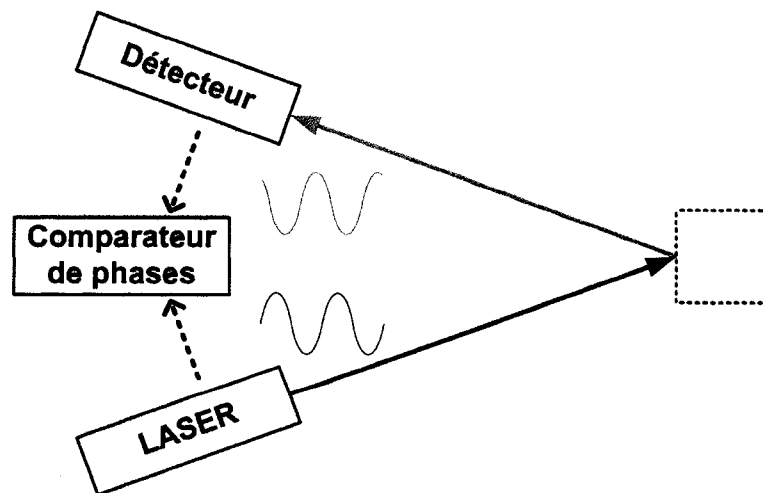


Figure 1.3: Principe de mesure par différence de phase

1.2.1.3 Détection de cohérence

La littérature réfère parfois à ce principe sous le terme “FM-CW” pour “*Frequency Modulation-Continuous Wave*”. Le capteur mesure ici la fréquence de battement résultant du mélange d’une onde laser émise modulée en fréquence et de la réflexion reçue de cette dernière (Hebert and Krotkov, 1992). Cette technique est encore plus précise que les deux précédentes, mais exige typiquement de l’équipement optique et électronique encore plus complexe. Les systèmes existants à ce jour sont généralement utilisés pour la mesure de phénomènes atmosphériques, par exemple (Argall and Sica, 2002), s’avèrent coûteux et peu compacts. Il semble exister très peu de capteurs de ce type dédiés à la mesure de distances pour des applications similaires à la robotique mobile. (Bergh et al., 2000) est une exception, présentant un lidar 3D construit autour d’un télémètre 1D AccuRange 4000 de la compagnie Acuity Laser Measurement. Ce télémètre utilise vraisemblablement le principe de détection de cohérence.

1.2.2 Mesure par triangulation

L’alternative aux méthodes de mesure par temps de vol est celle de la triangulation. Basé sur les mêmes principes géométriques que les systèmes à triangulation active, on émet ici un seul faisceau laser au lieu d’un motif sur deux dimensions. Une série de détecteurs alignés capte le retour du faisceau après que celui-ci ait rencontré l’obstacle visé. L’endroit où le retour du laser tombe sur la série de détecteur permet de déduire la distance de l’obstacle. Pour obtenir un capteur 2D ou 3D de la sorte, un ensemble de miroirs et/ou prismes mobiles permet de balayer la scène. Comparativement aux caméras à triangulation active, les algorithmes de traitement de signal nécessaires ici à la détection sont plus simples et plus robustes. La figure 1.4 schématise le principe de la triangulation.

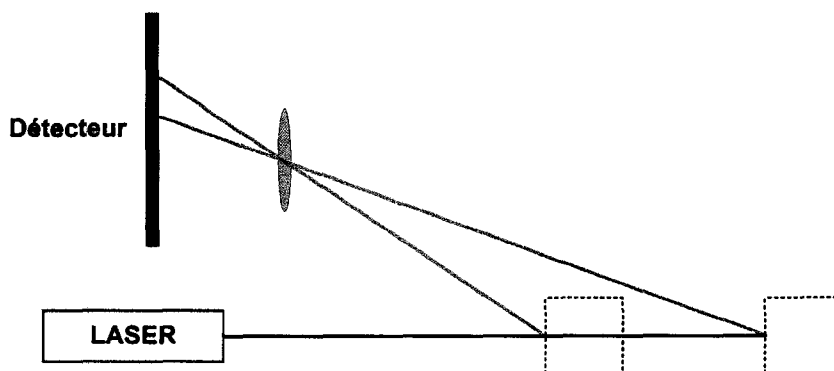


Figure 1.4: Principe de mesure par triangulation

Les capteurs qui mesurent par triangulation peuvent être très précis à courte distance (moins de 5 ou 10 mètres). Ceux-ci peuvent atteindre des précisions de l'ordre de la fraction de millimètre. Toutefois, comme pour les caméras à triangulation active, une plage plus grande exige une distance de séparation en conséquence entre l'émetteur et le récepteur. Cette distance limite rapidement la résolution et la plage disponible. De plus, en augmentant la distance de séparation, on augmente le phénomène d'occlusion et le système prend rapidement une taille trop grande pour être intégré à un robot mobile. Le LCS ("*Laser Camera System*") de la compagnie Neptec est basé sur ce principe. Le TriDAR, aussi de Neptec, combine un lidar à triangulation avec un lidar à mesure par temps de vol pour bénéficier des avantages respectifs des deux technologies sur une plage étendue.

CHAPITRE 2

DÉFINITION DES OBJECTIFS DE PERFORMANCE

Ce chapitre aborde dans un premier temps l'infrastructure de recherche dans laquelle s'inscrivent les travaux ici concernés, pour ensuite cerner les objectifs de recherche global et spécifiques relatifs au projet. Ces objectifs servent à établir et valider les spécifications du système à développer ainsi que la méthodologie utilisée.

2.1 Scénario d'opération typique

2.1.1 Navigation autonome

Tel que souligné dans (Vago, 2004) et (Volpe, 2005) à propos des prochaines missions vers Mars impliquant des robots mobile (ExoMars et Mars Science Laboratory -MSL), répondre aux besoins en exploration planétaire exigera des unités robotiques capables de parcourir au minimum des distances de l'ordre du kilomètre à chaque jour et ce, sans intervention humaine. En ce sens, les activités de recherche en robotique mobile de l'ASC se concentrent principalement depuis quelques années à développer des algorithmes permettant à un robot de naviguer par lui-même au-delà de son propre horizon sensoriel. Un aperçu de ces travaux est décrit dans (Dupuis et al., 2004), (Nsasi Bakambu et al., 2005), (Dupuis et al., 2005), (Nsasi Bakambu et al., 2006c), (Nsasi Bakambu et al., 2006b), (Nsasi Bakambu et al., 2006a), (Nsasi Bakambu et al., 2006d), (Dupuis et al., 2006), (Rekleitis et al., 2007b), (Rekleitis et al., 2007a), (Rekleitis et al., 2008) et (Dupuis et al., 2008).

La structure courante des algorithmes de navigation autonome est illustré à la figure 2.1.

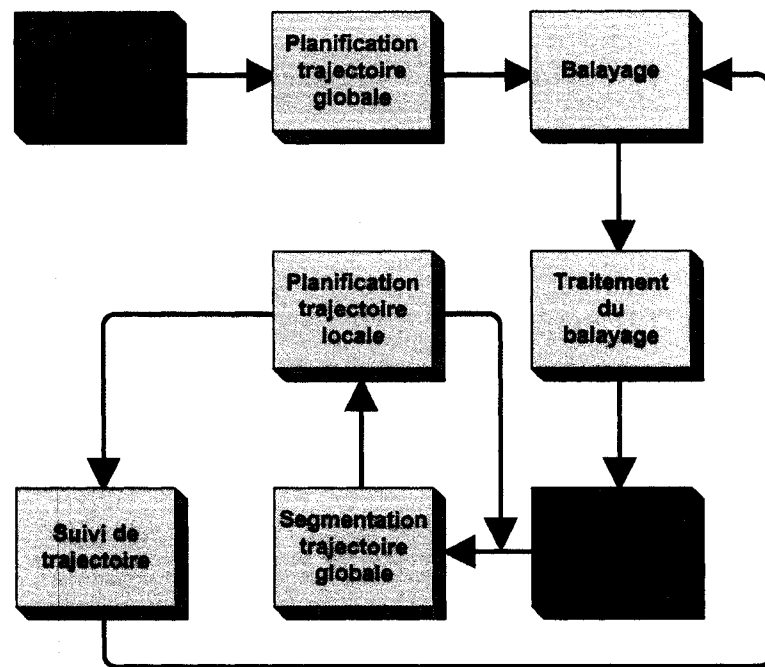


Figure 2.1: Flot du procédé de navigation autonome

Au départ, on suppose qu'une carte grossière globale de l'environnement est disponible, ainsi que la position précise du robot dans cette carte. Dans un contexte typique d'exploration planétaire, ceci constitue une hypothèse valable puisque de telles informations seraient typiquement disponibles à priori via de l'imagerie satellite, des missions antérieures ou des données acquises durant la descente.

Le robot peut alors planifier à l'aide de cette carte une trajectoire globale qui l'amènerait à la destination souhaitée. Commence alors la grande boucle de navigation autonome:

- Exécution d'un balayage de l'environnement à l'aide du capteur lidar.
- Traitement et transformation des données acquises en une carte locale sous forme de maillage triangulaire irrégulier.
- Localisation du robot dans la carte globale.
- Extraction du segment de la trajectoire globale qui chevauche la carte locale.

- Planification d'une trajectoire précise dans la carte locale, basée sur le segment extrait.
- Exécution de la trajectoire.

Le suivi de la trajectoire est fait par des algorithmes de guidage dérivés de (Astolfi, 1999). Une fois arrivé à l'extrémité de cette trajectoire locale, le processus reprend au début par un balayage de l'environnement et la boucle se répète ainsi jusqu'à l'atteinte de la destination finale.

Les travaux présentés dans ce mémoire visent à fournir une solution pour les sections "Balayage" et "Traitement du balayage".

2.1.2 Environnement expérimental

À l'heure actuelle, la plate-forme mobile principale de l'Agence spatiale canadienne est un robot nommé MRT ("Mobile Robotic Testbed"). Il s'agit à l'origine d'une plate-forme Pioneer 2-AT développée par la compagnie ActivMedia Robotics. Au fil du temps, plusieurs composants de la plate-forme ont été modifiés ou adaptés pour mieux répondre aux besoins. La figure 2.2 montre le robot en question dans sa configuration de 2006. À la base, les moteurs de ce robot sont munis d'encodeurs qui permettent l'odométrie et de capteurs de type sonar pour détecter les obstacles. Une boussole digitale et une centrale inertielle six axes, IMU 300 de Crossbow, y sont aussi installés. La centrale inertielle procure les trois vitesses angulaires et les trois accélérations linéaires qui permettent de corriger les lectures d'odométrie, sujette à l'erreur lorsque le robot tourne, puisqu'il utilise une direction différentielle. L'instrument beige que l'on aperçoit posé sur le robot est un Iliris-3D de la compagnie Optech, un capteur lidar 3D. Bien que très précis et offrant une portée impressionnante, le poids trop élevé et la puissance exigée par ce capteur faisait en sorte que le robot ne pouvait le transporter. Dans cette configuration,

le lidar était déposé sur le robot au moment où l'on devait exécuter des balayage et ensuite retiré chaque fois que le robot se déplaçait. C'est le capteur que l'on cherche ici à remplacer par une version mieux adaptée aux contraintes imposées par la plate-forme mobile.

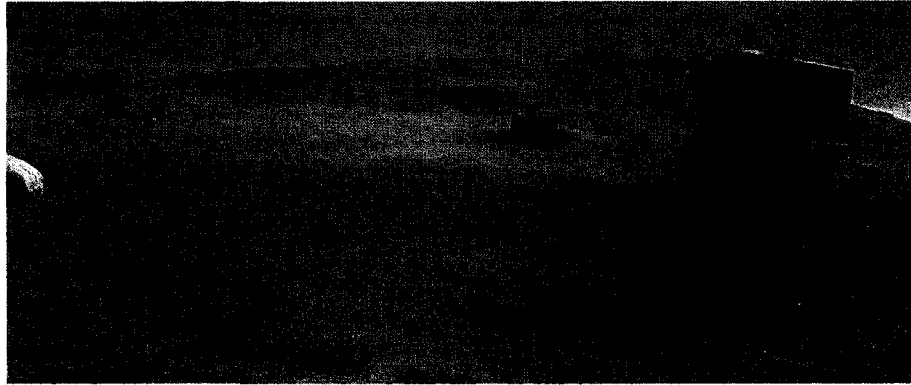


Figure 2.2: MRT, configuration de 2006, avec lidar Ilris-3D

Pour exécuter ses expériences avec les robots mobiles, l'ASC dispose d'une zone de 30 × 60 mètres qui émule différentes topologies typiques d'un environnement martien. Cette infrastructure dénommée terrain de Mars offre par exemple une plaine, une colline, une falaise, un canyon, des cratères, des champs de roches de diverses densités et un réseau de grottes. La figure 2.3 en présente un aperçu, alors que la figure 2.4 montre une reconstitution de l'ensemble du terrain sous forme d'une carte d'élévation numérique.

2.2 Représentation par maillage triangulaire

La structure de données choisie pour créer les cartes représentant l'environnement dans lequel le robot doit évoluer prend la forme de maillages triangulaires irréguliers. Ces maillages représentent simplement les surfaces en trois dimensions à partir d'un nuage de points en reliant les points voisins de façon à former des triangles (Fowler and Little, 1979). Lorsqu'on compare à d'autres structures communes comme les cartes d'élévation



(a) Vue du cratère



(b) Vue de la plaine

Figure 2.3: Terrain de Mars de l'ASC

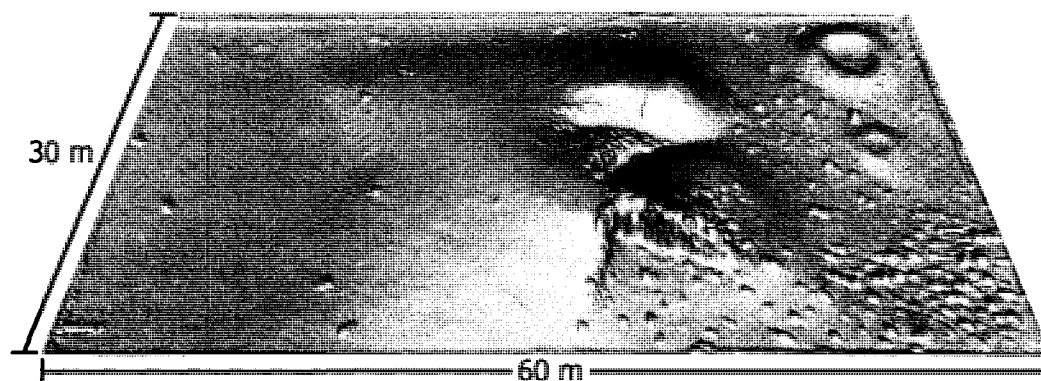


Figure 2.4: Carte d'élévation numérique du terrain de Mars de l'ASC (résolution = 20 cm)

numérique (DEM dans la littérature, pour *Digital Elevation Map*), les maillages triangulaires présentent l'avantage de pouvoir être décimé dans les régions présentant peu de reliefs, tout en conservant beaucoup de détails dans les régions aux traits géométriques plus complexes. On arrive donc à minimiser les besoins en espace mémoire sans nécessairement sacrifier la précision là où elle est requise. Ce support inhérent de la résolution variable est aussi tout indiqué pour des données acquises à l'aide d'un lidar au sol puisque le fait de balayer l'environnement à des résolutions angulaires fixes génère nécessairement des nuages de points dont la densité diminue à mesure que l'on s'éloigne du capteur.

Finalement, contrairement aux cartes d'élévation numérique qui sont des structures en 2,5 dimensions, un maillage triangulaire est réellement 3D, ce qui permet de représenter sans problème des structures géologiques concaves comme des surplombs, des grottes et des falaises.

Les maillages triangulaires irréguliers se prêtent bien à certains types algorithmes de planification de trajectoire. Ces derniers interprètent les maillages comme des graphes où chaque triangle représente un noeud. Lorsque le robot passe d'un triangle (noeud) à un autre, il traverse l'arête commune à ces deux triangles, alors considérée dans le

graphe comme l'arête reliant les deux noeuds concernés. En appliquant une fonction de coût appropriée à ces arêtes, le problème de planification de trajectoire devient alors un problème classique de recherche de graphe, solutionné dans le cas présent par les algorithmes Dijkstra ou A* (Dijkstra, 1959), (Nilsson, 1986)). Un des avantages majeurs des algorithmes de recherche de graphe est qu'ils ne peuvent pas rester pris dans un minimum local. Si une solution existe, ils la trouveront nécessairement. De plus, on peut s'assurer d'obtenir une solution optimale vis-à-vis la fonction de coût utilisée.

2.3 Objectif global

Le robot mobile de l'ASC doit être muni d'un capteur de type lidar afin de remplir les fonctions "Balayage" et "Traitement du balayage" tels que définies plus tôt à la figure 2.1. Comme il est mentionné dans (Kelly et al., 2006), alors que plusieurs robots mobiles ont recours à des télémètres qui balaient sur une seule ligne, peu de lidars balayant sur deux dimensions ont été développés jusqu'à présent pour des applications de robotique mobile en environnement extérieur (Bergh et al., 2000). De plus, aucune des solutions développées à cet effet n'est disponible commercialement. Les quelques capteurs lidar qui balaient sur deux axes que l'on retrouve sur le marché (POB, 2007) ciblent généralement le génie civil. Ils sont dispendieux, lourds, consomment beaucoup d'énergie et les interfaces logiciels sont le plus souvent conçus pour être opérés par un être humain, ce qui fait de ces capteurs une solution peu adaptée aux applications de robotique mobiles. Un exemple tout récent de capteur qui fait exception à la règle est le HDL-64E de la compagnie Velodyne Acoustics Inc. (Velodyne, 2008). Ce capteur a été conçu expressément pour les applications impliquant des véhicules mobiles. Une douzaine de véhicules inscrits au *DARPA Urban Challenge 2007* en étaient munis. Ce capteur offre un balayage excessivement rapide (> 1 millions de points/sec.) sur 360° avec un champ de vision vertical d'environ 26° . Néanmoins, la masse et la puissance élevées de ce capteur, ainsi

que son coût de plusieurs centaines de milliers de dollars, sont des obstacles majeurs à son implantation sur des applications robotiques de moindre envergure.

Le développement du capteur présent vient donc combler un besoin concret pour lequel il n'existe pas de solution abordable pré-établie, soit celui de fournir une source de données tri-dimensionnelles adéquate de l'environnement à une infrastructure robotique d'exploration planétaire.

2.4 Objectifs spécifiques

Pour atteindre l'objectif global et pouvoir être intégré à un robot mobile du calibre du MRT, le capteur et la partie logicielle correspondante devront pouvoir:

- Faire l'acquisition de points 3D pour une couverture complète de l'environnement, soit de gauche à droite sur 360° et de bas en haut sur 180°.
- Posséder une résolution suffisante pour détecter les obstacles. Pour le cas du robot mobile utilisé présentement à l'ASC, soit un Pioneer P2-AT modifié, les obstacles d'environ 5 cm sont insurmontables.
- Avoir une masse inférieure à 8 kg.
- Consommer moins de 30W en continu.
- Minimiser le nombre d'interfaces avec le robot de façon à pouvoir facilement être transféré sur un autre système.
- Reconstruire la surface sur le nuage de point sous forme d'un maillage triangulaire.
- Être constitué de composants disponibles commercialement afin de minimiser les coûts du dispositif et l'effort de conception/maintenance.

- Procurer une interface logicielle relativement simple et flexible à l'utilisateur. Le langage JAVA a été choisi pour assurer la compatibilité avec l'infrastructure logicielle de l'ASC.

CHAPITRE 3

CONCEPTION MATÉRIELLE

Ce chapitre présente les composantes utilisées pour construire le capteur FCL ("*Full Coverage Lidar*"). La figure 3.1 présente une vue d'ensemble des diverses composantes faisant partie du capteur.

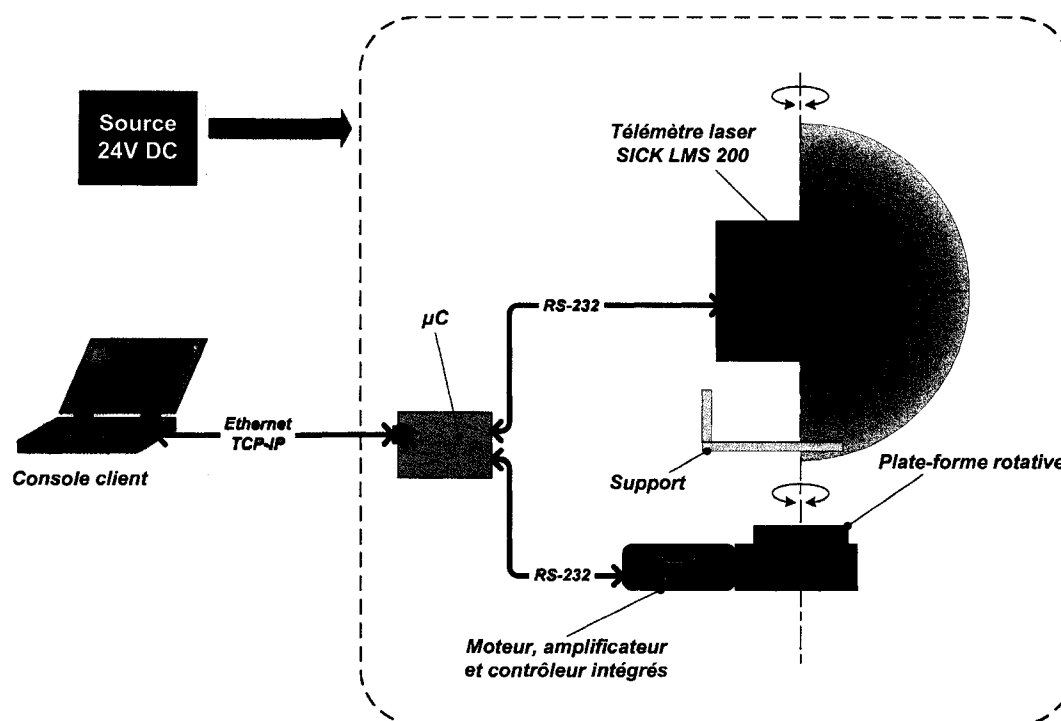


Figure 3.1: Vue d'ensemble des composants du capteur

3.1 Télémètre laser

La pièce centrale du capteur est le télémètre laser, l'instrument qui mesure les distance à l'aide d'un laser. Le télémètre utilisé est un modèle LMS200-30106, fabriqué par la com-

pagne SICK. Ce capteur, disponible sur le marché depuis une vingtaine d'années, est répandu dans plusieurs applications industrielles. Avec sa robustesse et sa résistance aux éléments (classé IP-65), ce capteur s'est vu intégré au fil des ans à plusieurs applications mobiles, incluant des milieux hostiles comme les mines (Baker et al., 2004), (Bakambu et al., 2004), (Thrun et al., 2003), (Runciman et al., 2001). On dénombrerait difficilement tous les travaux de recherche impliquant de près ou de loin le LMS200. (Brotten and Collier, 2006), (Ye and Borenstein, 2004), (Pfaff et al., 2007), (Pfaff and Burgard, 2005), (Triebel et al., 2006) et (Brenneke et al., 2003) ne sont que quelques exemples à cet effet. Un regard rapide aux "DARPA Grand Challenge" des années 2004, 2005 et 2007 (Urban Challenge) nous permet de constater que les véhicules inscrits utilisent presque invariablement tous un ou plusieurs capteurs LMS200 ou LMS291, une variante du LMS200 un peu mieux adaptée aux conditions extérieures. Ce capteur a donc un héritage important, un bon gage de fiabilité. De plus, des résultats de recherches visant à caractériser ses performances sont d'entrée de jeu disponibles, comme par exemple (Ye and Borenstein, 2002).



Figure 3.2: Télémètre laser LMS200 de SICK

Le télémètre SICK mesure les distances selon le principe de mesure par temps de vol.

Un miroir pivotant en continu permet de prendre des mesures dans un plan avec une ouverture de 100° ou 180° , selon le mode d'opération choisi (figure 3.3). Comme le laser infra-rouge utilisé est de classe 1, le capteur est sécuritaire pour les yeux. De ce fait, aucune mesure de protection spéciale n'est requise lors de son utilisation.

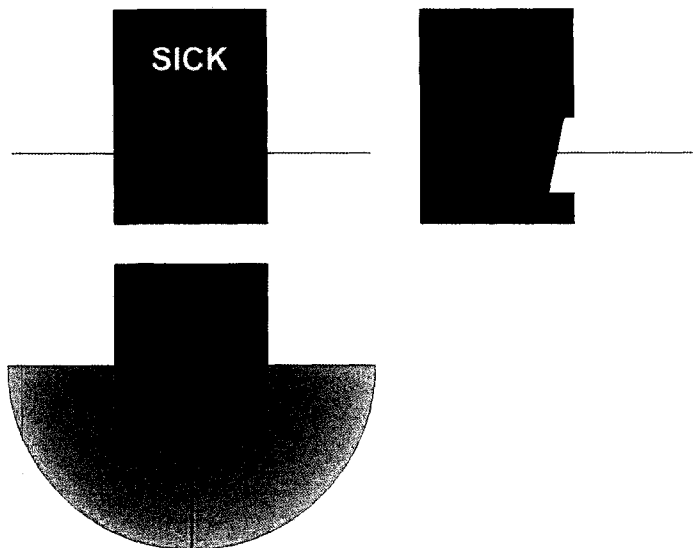


Figure 3.3: Pattern de balayage du LMS200

Un résumé des caractéristiques techniques du LMS200 se retrouve au tableau 3.1. Le LMS200 se détaille à l'heure actuelle à un peu moins de 7000\$CAN, un prix relativement abordable.

3.2 Plate-forme rotative

L'idée étant d'installer le télémètre laser de côté afin qu'il balaie de bas en haut, nous devons le fixer sur une plate-forme rotative qui nous permettra de le faire pivoter de gauche à droite sur 360° , nous procurant ainsi une couverture complète de l'environnement. La plate-forme utilisée est le modèle RM-3, fabriqué par Newmark Systems inc. (figure 3.4). Ses caractéristiques techniques sont résumées au tableau 3.2. Au moment

Tableau 3.1: Caractéristiques techniques du LMS200 (SICK, 2006)

Champs de vision	100° ou 180°
Résolution angulaire	0,25°, 0,5° ou 1°
Portée maximale	80 m (32,7 m @ résolution max.)
Résolution sur la mesure	10 mm
Précision sur la mesure	±35 mm (typ.)
Erreur systématique ¹	±15 mm (portée 1 à 8 m) ±4 cm (portée 1 à 20 m)
Écart type (1 σ)	5mm (portée ≤ 8 m)
Classe du laser	1 (sécuritaire pour les yeux)
Longueur d'onde	Infra-rouge ($\lambda = 905\text{nm}$)
Résistance aux intempéries	IP 65
Interface de communication	RS-232 ou RS-422
Vitesse de transmission	9,6/19,2/38,4 kBauds (RS-232) 500 kBauds (RS-422)
Tension d'alimentation	24V +/-15%
Puissance	20W
Poids	4,5 kg

¹ L'erreur systématique est la somme des déviations, sur une plage définie de portée et de réflectivité, qu'on ne peut réduire en faisant la moyenne de plusieurs mesures.

des recherches, cette plate-forme s'avérait être une des plus compacte relativement à la précision, la charge maximale et le prix. Son interface mécanique standard NEMA 17 facilite la sélection d'un moteur compatible.

Tableau 3.2: Spécifications de la plate-forme rotative RM-3 de Newmark

Répétabilité	5 arc-secondes
Démultiplication	90:1
Interface moteur	NEMA 17, arbre de 5 mm
Charge maximale	68 kg
Moment maximal	16,9 Nm
Vitesse d'entrée max.	900 tours/min.
Poids	1,3 kg

Pour l'application présente, la plate-forme rotative ne se déplace pas continuellement. Dès que le FCL cesse de faire l'acquisition de données, la plate-forme devient immobile. Comme un moteur pas-à-pas consomme typiquement une puissance nominale même ar-

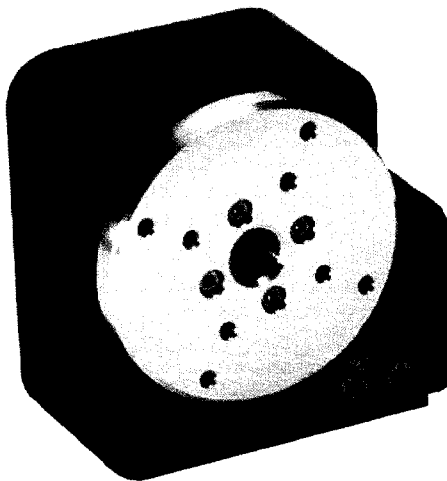


Figure 3.4: Plate-forme rotative RM-3, de Newmark Systems inc.

rêté, cette technologie ne représente pas l'option la plus économe côté énergie. Puisque nous voulons un capteur mobile, vraisemblablement alimenté par piles, mieux vaut minimiser la puissance requise. Le choix d'un moteur DC ou DC sans balai constitue alors une meilleure option.

Le moteur choisi pour actionner la plate-forme rotative est un SmartMotor©, modèle SM1720D85C, produit par la compagnie Animatics (figure 3.6). Les moteurs de cette série sont des moteurs intégrés DC sans balais, i.e. on retrouve à même le moteur un encodeur optique ainsi que l'électronique de puissance et de contrôle. Il suffit d'alimenter le moteur pour pouvoir ensuite le contrôler en couple, vitesse ou position via des commandes envoyées sur son port de communication. Le moteur est donc complet en soit, aucune électronique externe n'est nécessaire, ce qui simplifie l'intégration. La série SmartMotor© permet de programmer certaines opérations logiques à même le micro-contrôleur interne du moteur. Le modèle SM1720D85C est le plus petit disponible, sa taille NEMA 17 et son arbre de 5 mm sont parfaitement compatibles avec la plate-forme rotative.

Il faut s'assurer que l'ensemble moteur/plate-forme rotative produira suffisamment de

couple pour la charge que constitue le télémètre laser. Pour ce faire, il est conservateur de considérer le télémètre LMS200 comme un prisme rectangulaire de densité uniforme. S'il pivote autour d'un axe passant par son centre géométrique, qui coïncide donc avec son centroïde, le moment d'inertie du télémètre autour de cet axe est alors défini par l'équation

$$J = \frac{1}{12} m (a^2 + b^2) \quad (3.1)$$

où J est le moment d'inertie, m la masse et a et b sont des dimensions du télémètre (figure 3.5).

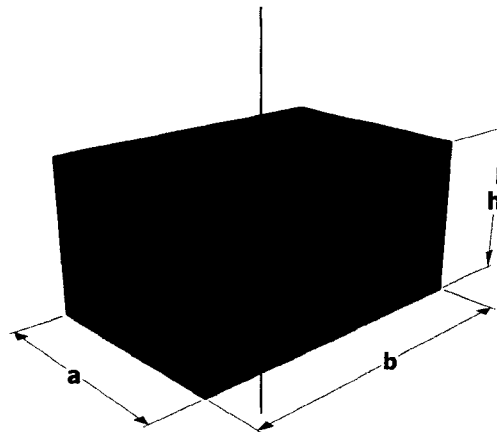


Figure 3.5: Définition des paramètres pour le moment d'inertie

En considérant le LMS200, nous avons $a = 0,156$ m, $b = 0,185$ m et $m = 4,5$ kg. Afin de tenir compte de la masse de la plaque de support et de la partie rotative de la plate-forme, il serait probablement suffisant d'estimer la masse totale à au plus 5,5 kg. Posons 6 kg pour une marge d'erreur plus que suffisante, on obtient alors à l'aide de l'équation 3.1 un moment d'inertie $J \approx 0,02928$ kgm².

Le couple τ requis pour produire l'accélération angulaire α sur un corps au moment

d'inertie J est

$$\tau = J\alpha \quad (3.2)$$

Les spécifications de la plate-forme rotative indiquent une vitesse maximale en sortie de 10 tours/minute, ce qui correspond à $\pi/3$ rad/s. Si l'on suppose vouloir passer rapidement d'une vitesse nulle à la vitesse maximale, disons en 0,1 seconde, on requiert alors une accélération angulaire $\alpha = 10\pi/3$ rad/s². En utilisant l'équation 3.2, on trouve un couple requis $\tau \approx 0,307$ Nm. Le couple maximal admissible de la plate-forme rotative est de 16,9 Nm. Le moteur affiche un couple admissible de 0,22 Nm(continu) / 0,6 Nm(pointe), ce qui se traduirait avec le découplage de la plate-forme à 19,8 Nm(continu) / 54 Nm(pointe) si on négligeait les pertes dans le mécanisme de transmission. Ainsi, on constate d'abord que l'ensemble moteur/plate-forme rotative est amplement capable de fournir le couple nécessaire pour faire pivoter le télémètre. Même avec une vitesse maximale dix fois plus élevée ou un temps d'accélération dix fois plus court, la marge de manoeuvre resterait suffisante. Ensuite, il est à noter que puisque le moteur offre plus de puissance et une vitesse maximale plus élevée que les limites spécifiées de la plate-forme rotative, nous avons intérêt à configurer adéquatement les paramètres de limites en vitesse et courant du moteur pour éviter d'endommager la plate-forme.

3.3 Micro-contrôleur

L'architecture développée exige la synchronisation de l'acquisition des données par le télémètre laser avec les mouvements de la plate-forme rotative. Pour s'assurer de meilleures performances et afin d'obtenir un capteur complet en soi, il vaudrait mieux ne pas imputer cette tâche à l'ordinateur de bord du robot mobile. Un micro-contrôleur se charge donc de cette tâche, relayant par la suite les données mesurées à l'ordinateur

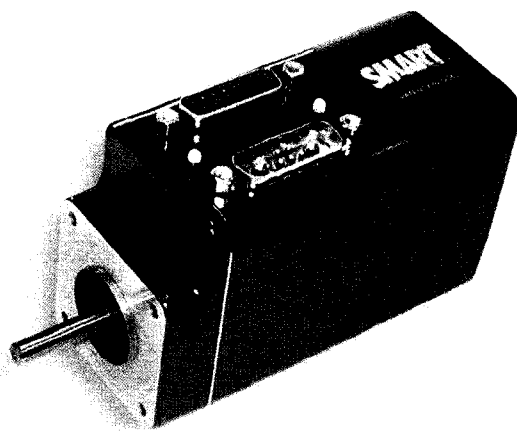


Figure 3.6: Moteur SM1720D85D de Animatics

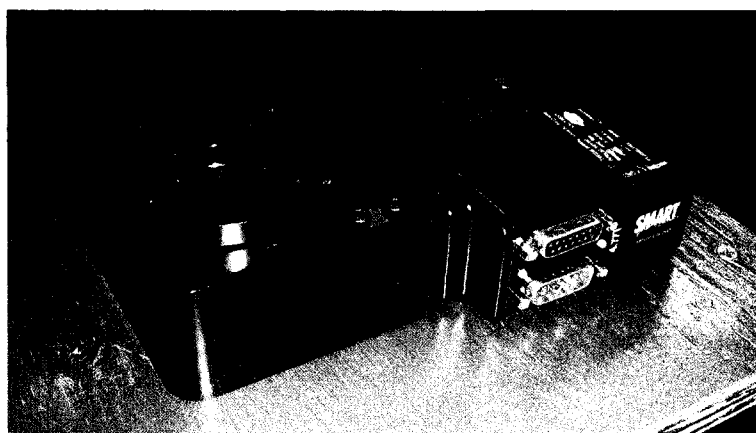


Figure 3.7: Assemblage du moteur et de la plate-forme rotative

de bord. Le télémètre laser et le moteur de la plate-forme rotative exigent tous deux un lien de communication série RS-232, alors que le lien entre le micro-contrôleur et l'ordinateur de bord se fait par Ethernet (protocole TCP-IP). Il est donc possible de contrôler le capteur via n'importe quel réseau Ethernet standard, que ce soit par une connexion directe de la console, via un réseau local (LAN) avec ou sans-fil, ou même en passant par internet. Le micro-contrôleur utilisé à cette fin est un RCM3720, fait par Rabbit Semiconductor (figure 3.8). Ses caractéristiques sont résumées au tableau 3.3.

La figure 3.9 présente le boîtier dans lequel est intégré le micro-contrôleur, les quelques

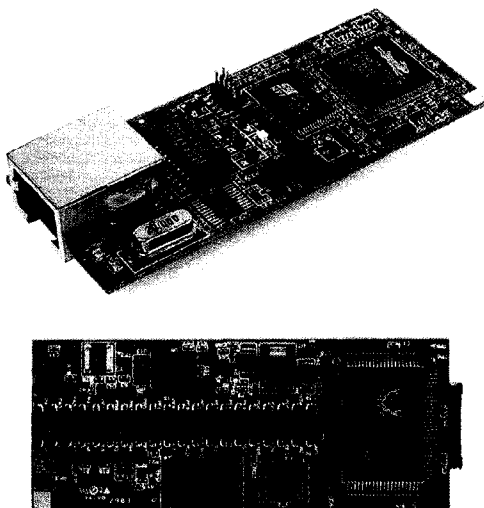


Figure 3.8: Micro-contrôleur Rabbit RCM3720

circuits externes nécessaires à son fonctionnement et les connecteurs d'interface.

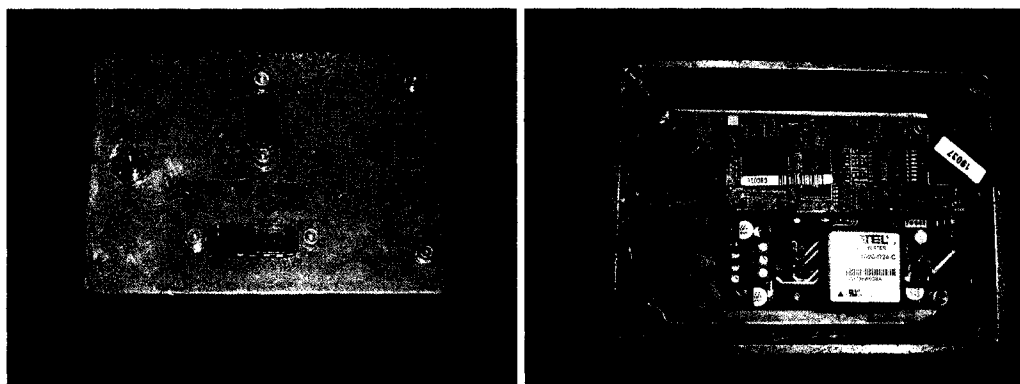


Figure 3.9: Assemblage du micro-contrôleur

3.4 Alimentation

Le télémètre laser et le moteur exigent tous deux une alimentation en puissance de 24V DC. Le micro-contrôleur de son côté doit être alimenté par une source 5V. Le capteur a donc été conçu pour opérer à partir d'une alimentation unique de 24V. La plaquette de

Tableau 3.3: Spécifications du RCM3720

Microprocesseur	Rabbit 3000A @ 22.1 MHz
Lien Ethernet	10Base-T, RJ-45
Mémoire Flash	512 KB
Mémoire SRAM	256 KB
Mémoire Flash série	1 MB
E/S	33 numériques
Ports série	4 ports compatible CMOS 3,3V
Alimentation	4,75-5,25 VDC, 100 mA @ 22,1 MHz
Température d'opération	-40°C à 70°C
Humidité	5-95% H.R. sans condensation
Taille	75 × 30 × 22 mm

circuit imprimé sur laquelle se fixe le micro-contrôleur a été munie d'un convertisseur DC-DC qui génère l'alimentation à 5V pour ce dernier. L'utilisation d'un régulateur linéaire aurait été difficile, voir impossible dans le cas présent, étant donné la puissance trop importante que le régulateur aurait dû dissiper pour abaisser la tension de 24 à 5V. En plus de son efficacité accrue, le convertisseur DC-DC utilisé (UWR-5/1000-D24 de Datel) a l'avantage d'isoler la masse du 5V (signal) de celle du 24V (puissance), une bonne pratique à adopter pour minimiser les risques d'interférence électrique.

Comme le robot mobile ciblé pour l'intégration initiale du capteur est le MRT et que celui-ci fonctionne sur 12V, un convertisseur DC-DC isolé (modèle VHB75-D12-S24 de V-Infinity) est utilisé pour générer la source 24V requise. Le schéma de la distribution des alimentations est présenté à la figure 3.10.

3.5 Interconnexions électriques

L'annexe I rassemble les schémas détaillés de connexion des divers éléments du capteur.

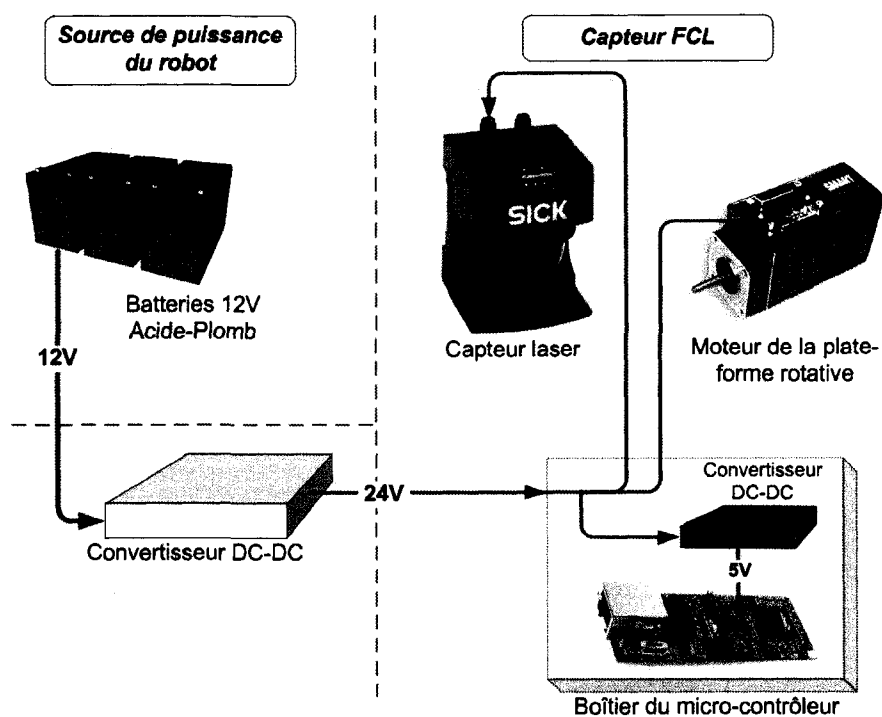


Figure 3.10: Schéma de la distribution des alimentations

3.6 Capteur FCL assemblé

Le capteur assemblé est présenté aux figures 3.11 et 3.12.

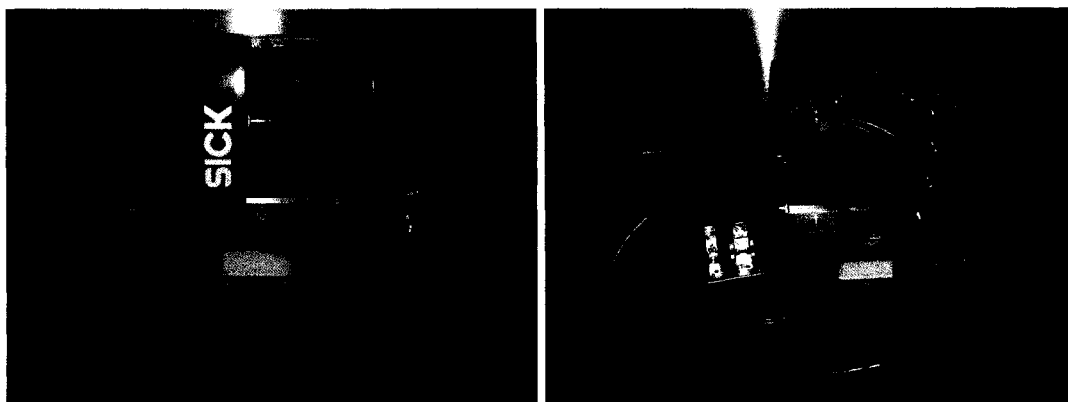


Figure 3.11: Capteur FCL assemblé, vue de face et d'arrière

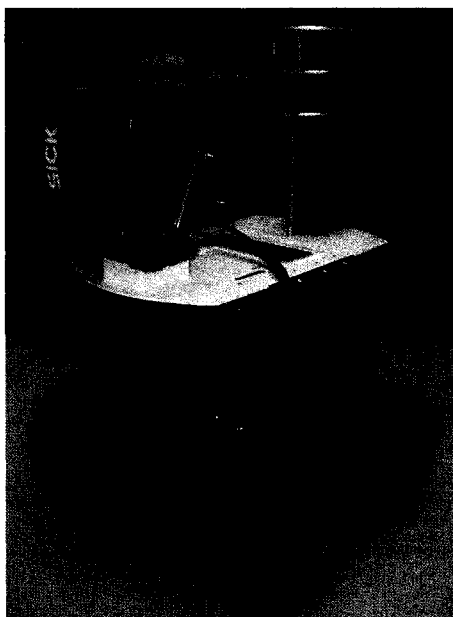


Figure 3.12: Assemblage final du FCL sur le robot mobile MRT

CHAPITRE 4

ARCHITECTURE LOGICIELLE

Ce chapitre explique l'architecture logicielle développée pour contrôler le capteur FCL. Cette architecture se divise en deux parties principales. Tout d'abord, il y a la partie logicielle embarquée qui s'exécute localement sur le capteur. Celle-ci gère principalement le contrôle à bas niveau du capteur, permettant de faire l'acquisition de données et de transmettre celles-ci à la console client. La seconde partie est exécutée sur la console client. Elle permet dans un premier temps de paramétrer et lancer l'acquisition de données. Elle traite ensuite les points 3D reçus de façon à produire un maillage triangulaire adéquat pour l'infrastructure de navigation. Le diagramme de flot de données de la figure 4.1 présente une vue d'ensemble de l'architecture logicielle concernée.

4.1 Contrôle embarqué bas niveau

Le contrôle à bas niveau du matériel se retrouve distribué à deux endroits: sur le micro-contrôleur interne du moteur et sur le micro-contrôleur Rabbit RCM3720.

Le micro-contrôleur interne du moteur se charge d'initialiser la lecture de position de la plate-forme rotative lorsqu'on met le capteur sous tension. Une fois l'initialisation faite, la logique implanté se charge simplement de retourner au RCM3720, via le port série, la lecture courante de position à chaque fois que le RCM3720 commande un déplacement.

Le micro-contrôleur Rabbit RCM3720 constitue le cerveau du capteur. D'une part il commande le télémètre laser et le moteur de la plate-forme rotative via deux liens série (RS-232). D'autre part il fournit une interface externe par lien Ethernet. La communi-

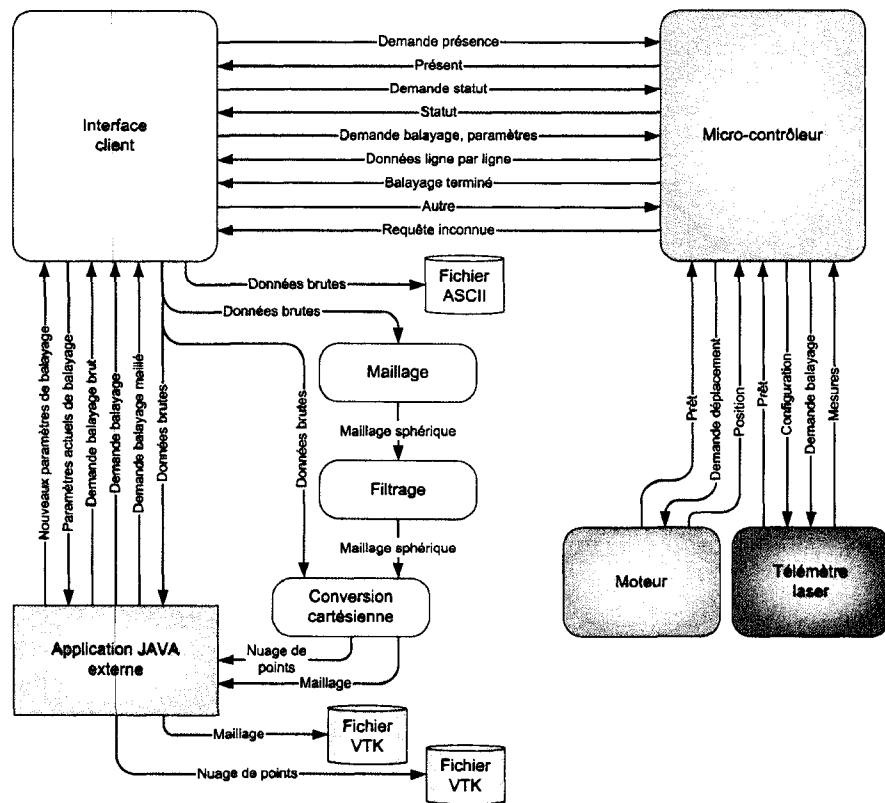


Figure 4.1: Diagramme de flot de données de l'architecture logicielle

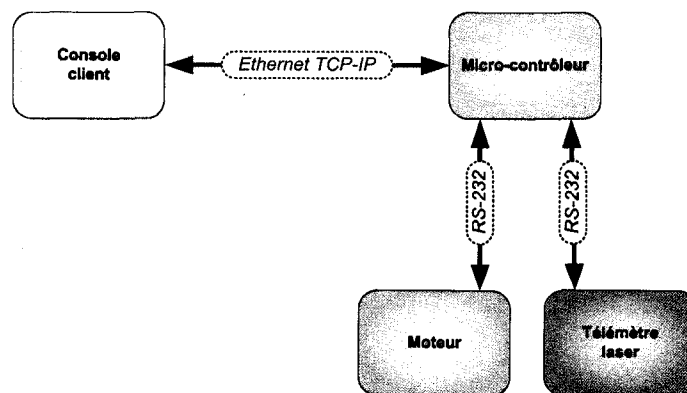


Figure 4.2: Architecture des liens de communication

cation avec le télémètre laser s'effectue à 38400 bits/s, soit la vitesse la plus élevée supportée par le télémètre lorsqu'on utilise son port série RS-232. Le protocole de communication implanté pour ce lien est celui du télémètre LMS200, tel que défini dans (SICK, 2003). La communication avec le moteur se fait à 19200 bit/s, ce qui est amplement suffisant étant donné le peu de données qu'il est nécessaire d'échanger entre le RCM3720 et le moteur.

Lors de la mise sous tension, le RCM3720 attend tout d'abord de recevoir un message du moteur indiquant que la plate-forme rotative a été initialisée comme il se doit. De façon concourante, il interroge le télémètre laser à intervalle régulier. Lorsque celui-ci a terminé sa séquence d'initialisation, sa réponse indique au micro-contrôleur que le capteur est prêt à être utilisé. Le micro-contrôleur démarre alors son serveur TCP-IP et se met en mode "écoute", attendant une connexion d'un client qui pourra alors lui envoyer des requêtes pour lancer le processus de balayage. La machine à états finis qui gère la réponse du capteur aux requêtes du client est schématisée à la figure 4.3.

En fonctionnement normal, lorsque le micro-contrôleur reçoit une commande du client demandant d'exécuter un balayage, il interprète la commande reçue pour en extraire les paramètres de balayage (résolutions et champs de vision en azimuth et élévation). Il configure alors le télémètre en conséquence et commande la plate-forme rotative pour l'amener au premier azimuth du champ de vision requis. Un premier balayage est ensuite demandé au télémètre laser. Une fois les mesures du balayage vertical acquises, le micro-contrôleur transmet celles-ci à la console client (lien TCP-IP). Il déplace ensuite la plate-forme rotative au prochain azimuth en fonction de la résolution demandée, où il commandera de nouveau un balayage au télémètre. Le cycle se poursuit ainsi jusqu'à ce que le champ de vision demandé au départ ait été couvert entièrement. Le micro-contrôleur ramène alors la plate-forme rotative à sa position centrale et transmet une dernière trame au client indiquant que le balayage est complet. Il retombe ensuite en mode d'écoute, attendant une nouvelle commande de la part du client. Tout au cours

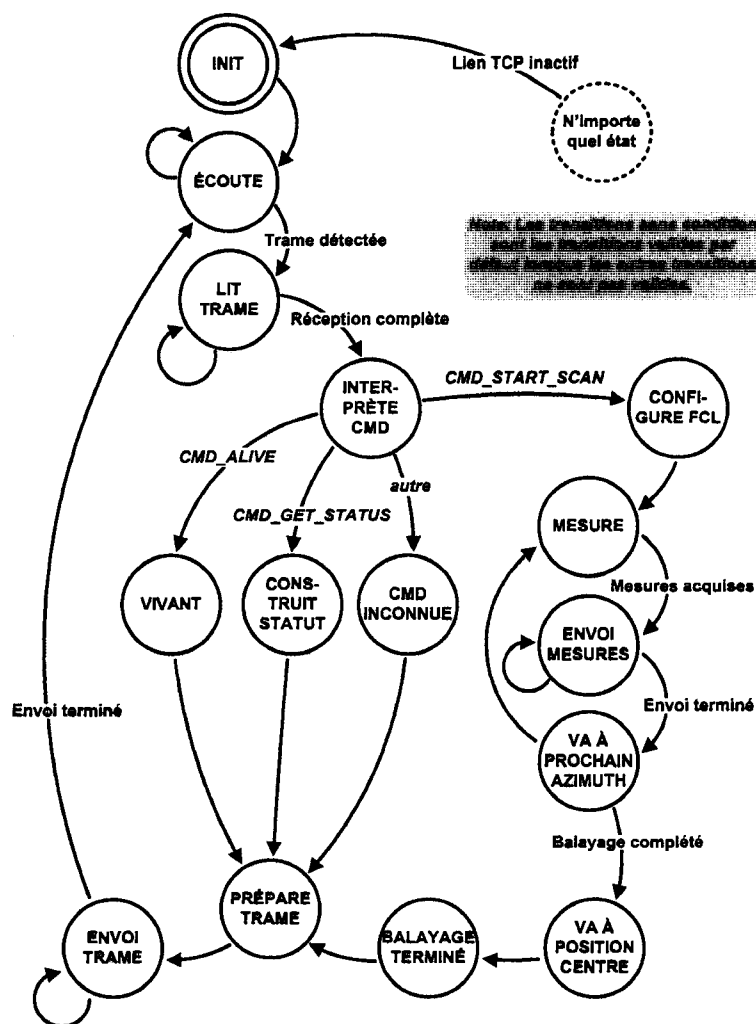


Figure 4.3: Machine à états finis embarquée du FCL

du processus, s'il arrive que le lien de communication TCP-IP soit interrompu, de façon volontaire ou non, la machine à état fini cesse l'action courante et revient simplement au stade d'initialisation, prête à recevoir une nouvelle connexion d'un client.

La figure 4.4 montre un exemple de nuage de points acquis par le capteur FCL. Ce balayage a été pris sur le terrain martien de l'ASC en juillet 2007, du côté sud, dans la vallée à l'entrée du canyon. Il contient un peu plus de 125 000 points. Les paramètres de ce balayage sont rassemblés au tableau 4.1. Afin de mieux visualiser l'ensemble, un modèle du robot mobile a été inséré dans le nuage de points à l'endroit où était situé

le robot lorsque le balayage fut exécuté. On constate bien avec cet exemple l'effet de résolution variable résultant du fait que le capteur soit relativement près du sol. Alors que les premiers mètres autour du robot contiennent une densité élevée de points, celle-ci diminue graduellement à mesure que l'on s'éloigne.

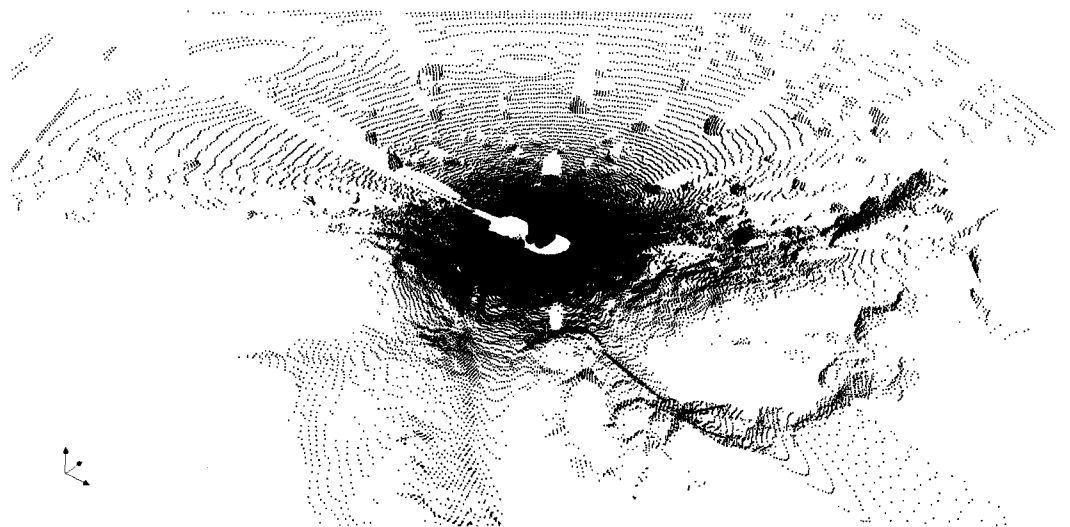


Figure 4.4: Exemple de nuage de points généré par le FCL

Tableau 4.1: Paramètres de balayage, données de la figure 4.4

Azimuth	Champs de vision	360°
	Résolution	0,5°
Élévation	Champs de vision	100°
	Résolution	0,25°
Portée	Minimum	0,75 m
	Maximum	32,75 m
nb. de points acquis		128445

4.1.1 Protocole de communication

Les échanges entre la console client et le capteur FCL via le lien TCP-IP adoptent toujours le format de trames présenté à la figure 4.5.

Les deux premiers octets constituent une entête fixe permettant de confirmer qu'il s'agit

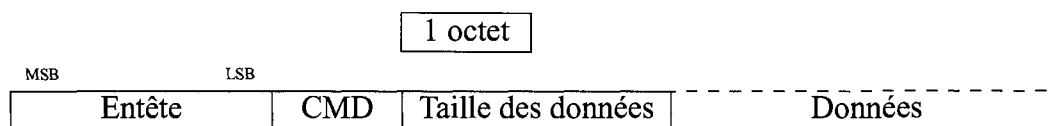


Figure 4.5: Définition du format des trames

bien du début d'une trame. Ces octets prennent la valeur arbitraire 0x55AA, représentant en binaire une alternance régulière de 0 et de 1 qu'il serait peu vraisemblable de rencontrer sur un signal bruité.

L'octet suivant contient la commande véhiculée par la trame. Les sept bits les moins significatifs servent à coder les commandes envoyées par la console client. Les valeurs possibles s'échelonnent donc de 0 à 127, le huitième bit étant fixé à 0. Lorsque le microcontrôleur du FCL répond au client, il utilise toujours l'octet de commande reçu sur lequel il fixe le huitième bit à 1. Ceci permet de différencier les commandes transmises par le client des réponses du capteur, tout en permettant au client de vérifier que les réponses reçues concernent bien les requêtes envoyées au départ.

Les deux octets subséquents prennent une valeur qui correspond au nombre d'octets de données qui suivent. Sachant le nombre d'octets à lire, ceci évite de devoir implanter une entête de fin de trame dans le protocole.

Finalement, la dernière partie de la trame contient les données. Le nombre d'octets figurants ici et leur contenu est hautement variable puisqu'il dépend de la commande et/ou réponse véhiculée par la trame.

On note qu'aucun mécanisme de détection/correction d'erreur n'est utilisé au niveau des trames. Puisque le protocole TCP-IP contient déjà des mécanismes de correction appropriés advenant une erreur de transmission, il n'a pas été nécessaire d'en implanter à ce niveau.

4.2 Traitement des données

Une fois que les données mesurées lors du balayage sont reçues par la console client, le travail physique du capteur est terminé. Par contre, les données brutes doivent être manipulées pour arriver à un maillage triangulaire adéquat. Les données brutes ont le format (θ, ϕ, r) , i.e. un système de coordonnées sphériques, illustré à la figure 4.6:

- θ : Coordonnée du capteur en azimuth $[-180^\circ..180^\circ]$; correspond à l'orientation de la plate-forme rotative
- ϕ : Coordonnée du capteur en élévation $[-90^\circ..90^\circ]$; correspond à l'angle de mesure du télémètre laser
- r : Distance allant de l'origine du capteur jusqu'au point mesuré

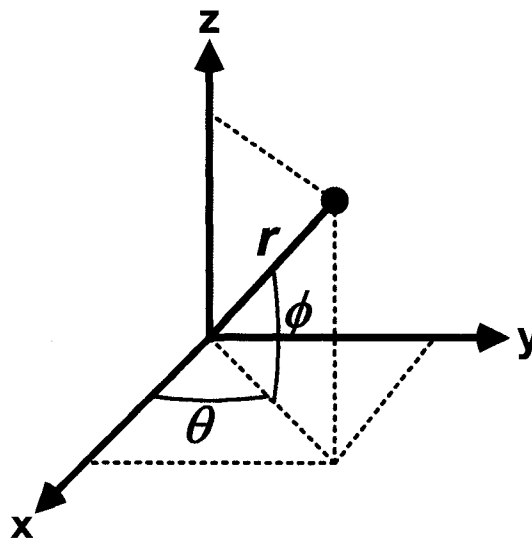


Figure 4.6: Définition des coordonnées sphériques utilisées

Le référentiel cartésien adopté ici définit l'axe x orienté vers l'avant du capteur, l'axe y vers la gauche et l'axe z vers le haut (figure 4.8). Dans le repère sphérique, la convention

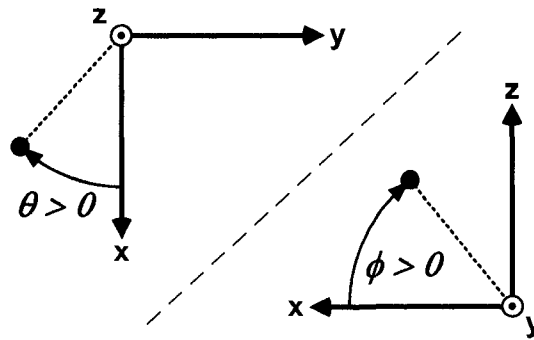


Figure 4.7: Définition des polarités des coordonnées sphériques

adoptée fixe l'origine angulaire $(\theta, \phi) = (0, 0)$ coïncidant avec l'axe x . Les polarités des coordonnées θ et ϕ est illustré à la figure 4.7.

Le maillage final doit être exprimé en coordonnées cartésiennes afin d'en faciliter l'interprétation et le traitement subséquents. L'approche adoptée ici génère toutefois le maillage directement sur les coordonnées sphériques brutes. Certaines manipulations et l'application de quelques filtres permettent ensuite de s'assurer que le maillage est représentatif de l'environnement physique initialement balayé par le capteur FCL. Le produit final est alors obtenu en transformant les données du maillage en coordonnées cartésiennes. Cette section explique ces différentes étapes de traitement qui façonnent les données acquises afin qu'elles puissent ensuite être utilisées par le reste de l'infrastructure de navigation autonome.

4.2.1 Filtrage du robot

Puisque le capteur FCL offre une couverture complète de l'environnement, chaque balayage exécuté retournera du même coup des points reflétant le robot sous le capteur, ainsi que certains composants du capteur comme la plate-forme rotative et quelques câbles. Peu importe où se trouvera le robot au moment où il demandera un balayage au capteur, sa propre "image" se retrouvera au même endroit dans le nuage de points, sous le capteur.

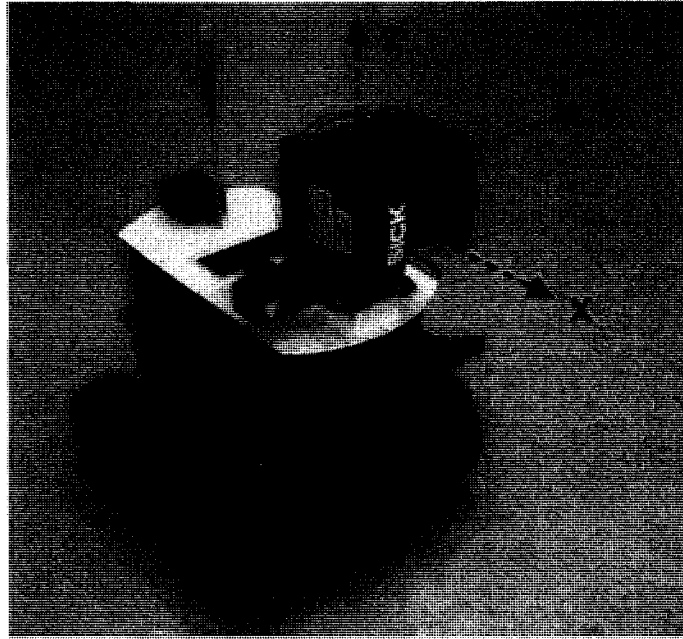


Figure 4.8: Référentiel cartésien du FCL

Comme ces points ne font pas partie de l'environnement comme tel, il faut les exclure du nuage de points avant de pouvoir traiter celui-ci. À cet effet, un tableau chargé en mémoire associe à divers azimuths des valeurs minimales d'élévation admissibles reflétant le profil du robot. Ces valeurs représentent les seuils d'élévation ϕ_{min} sous lesquels le capteur détecterait le robot et non l'environnement qui l'entoure. Chaque point mesuré est donc ici comparé à ces seuils et retiré de l'ensemble de données le cas échéant. De là, les points restants ne constituent que l'environnement autour du robot, nous pouvons donc les soumettre au processus de maillage.

4.2.2 Génération du maillage

Pour générer un maillage sur un ensemble de points, la triangulation de Delaunay est un algorithme couramment utilisé. Une triangulation est dite de Delaunay lorsque pour chaque triangle du maillage, le cercle passant par les trois sommets dudit triangle ne

contient aucun autre point (critère du cercle vide). Un tel cas est illustré à la figure 4.9. À moins qu'un ensemble de points ne présente certains cas dégénératifs particuliers¹, cet ensemble admettra une unique triangulation de Delaunay. De plus, une triangulation de Delaunay a pour effet de maximiser l'angle minimum des triangles, ce qui aide à éviter la génération de triangles minces et allongés.

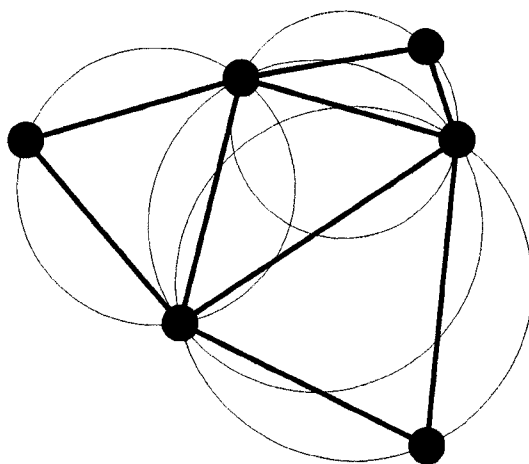


Figure 4.9: Triangulation de Delaunay, critère du cercle vide

La triangulation de Delaunay peut théoriquement s'appliquer sur des données représentées dans n'importe quel nombre de dimensions. En pratique toutefois, les versions à deux et trois dimensions sont celles qui trouvent généralement application. Delaunay 2D prend un ensemble de point sur un plan et relie ceux-ci de façon à former des triangles. Delaunay 3D accepte un ensemble de point distribués dans un volume et relie ceux-ci pour former des tétraèdres. La version 2D génère donc des surfaces alors que la version 3D produit des volumes. Il est toutefois possible d'utiliser Delaunay 2D pour générer une surface sur un ensemble de points en trois dimensions. Il suffit de projeter les points sur un plan unique, d'appliquer l'algorithme, et d'ensuite reprojeter les points dans la troisième dimension, à leurs positions initiales. Prenons par exemple un nuage de

¹Pour une triangulation unique de Delaunay en 2D, l'ensemble de points ne peut contenir d'ensembles de trois points colinéaires, ni de quatre points situés sur un même cercle (Wikipedia, 2008). Le cas où plus d'un point auraient exactement les mêmes coordonnées poserait aussi problème.

point qui serait défini par les coordonnées (x, y, z) . On applique alors Delaunay 2D sur l'ensemble des (x, y) [plan $z = 0$]. On obtient donc un maillage dans le plan XY . En ré-établissant les coordonnées z à leurs valeurs initiales, le maillage devient une surface dans l'espace tri-dimensionnel. La figure 4.10 permet de comparer l'effet sur un ensemble de points 3D d'un maillage basé sur l'algorithme Delaunay 2D comparativement à la version 3D.

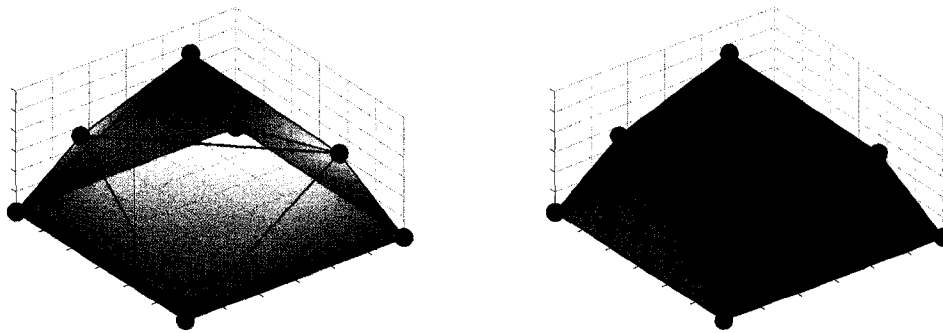


Figure 4.10: Maillage avec l'algorithme Delaunay 2D (gauche) vs 3D (droite)

Pour la représentation de terrains, le recours à Delaunay 2D est tout indiqué. Il y a toutefois une mise en garde à observer lors de l'utilisation de la triangulation de Delaunay 2D sur des données en 3D: du fait que l'algorithme s'exécute dans un plan, ignorant la troisième dimension lors du maillage, l'ensemble de données initial doit être en $2\frac{1}{2}D$, i.e. que pour chaque couple de données dans le plan où le maillage est effectué, correspond une seule et unique coordonnée dans la troisième dimension. Autrement dit, les données doivent présenter deux coordonnées indépendantes (plan de maillage) et une troisième dite dépendante des deux premières. Si nous devions avoir des données 3D pures, nous pourrions rencontrer des cas où deux points possèdent les mêmes coordonnées dans le plan de maillage, mais deux coordonnées différentes dans la troisième dimension. Impossible alors de déterminer où projeter la surface maillée sur la troisième dimension.

Les cartes d'élévation numérique répondent bien à ce critère $2\frac{1}{2}D$, puisque pour chaque

coordonnées (*longitude, latitude*) [ou (x, y)], correspond une seule valeur d'élévation $[z]$. Cette caractéristique est toutefois ce qui empêche les cartes d'élévation numérique de pouvoir représenter certaines topologies de terrain comme des surplombs et des grottes, tel que présenté précédemment au chapitre 2.

Dans le cas qui nous concerne, puisque les mesures sont prises à partir du sol, la conversion des données brutes en coordonnées cartésiennes permet de bien représenter des topologies géographiques concaves comme les surplombs et les grottes. Dans de tels cas, nous obtenons toutefois des données cartésiennes qui sont réellement 3D, et non une carte d'élévation numérique $2\frac{1}{2}$ D. La triangulation de Delaunay 2D ne peut donc pas être facilement appliquée sur ces données cartésiennes. Tel que souligné dans (Gemme, 2006), le maillage de points 3D à la base est loin d'être trivial. (Campbell and Flynn, 2001) offrent entre autre une revue de littérature étendue sur le sujet. Néanmoins, exprimées à partir du référentiel du capteur, les coordonnées sphériques brutes (θ, ϕ, r) générées par celui-ci répondent parfaitement au critère $2\frac{1}{2}$ D. Pour chaque couple de coordonnées azimuth-élévation (θ, ϕ) ne correspond toujours qu'une seule et unique mesure de distance r . Par conséquent, le maillage des points exécuté sur les coordonnées (θ, ϕ) avec Delaunay 2D sera toujours valide et produira un maillage représentatif de l'environnement réel où les relations de voisinage entre les points seront implicitement correctes.

Il existe plus d'une méthode pour calculer une triangulation de Delaunay en deux dimensions. La plus efficace des méthodes connues, "diviser-pour-régner", s'exécute en $O(n \log n)$. En ce qui concerne notre application, les structures de données utilisées sont basées sur VTK (*Visualization ToolKit*) (Kitware, 2008). Les bibliothèques de VTK fournissent déjà les fonctions qui permettent d'obtenir efficacement la triangulation de Delaunay, même pour de gros nuages de points ($> 100\,000$ pts).

4.2.3 Couture

En prenant des mesures sur 360° en azimuth, le point de départ coïncide nécessairement avec le point d'arrivée. Physiquement, les données acquises à l'azimuth -180° seront les mêmes que celles à 180° . Pour l'algorithme de maillage par contre, ces coordonnées se retrouvent à deux extrémités distinctes de l'échelle sphérique. Un mécanisme est nécessaire pour "coudre" ces deux extrémités ensemble, autrement la topologie du maillage présentera une discontinuité à cet azimuth une fois les données converties dans l'espace cartésien.

La technique utilisée, telle que schématisée à la figure 4.11, consiste à s'assurer en un premier temps qu'il n'y a pas de chevauchement dans les données lorsqu'on fait l'acquisition sur un tour complet (360°). À titre d'exemple, supposons que l'on veuille une résolution en azimuth de 1° : le capteur prendra ses lectures à tous les degrés, de -180° à 179° inclusivement (à 180° , on chevaucherait les données acquises à -180°). De là, on copie les points de la première coordonnée en azimuth ($\theta = -180^\circ$) à la suite des derniers points acquis, créant une série de données à $\theta = 180^\circ$. L'algorithme de maillage est ensuite exécuté sur cet ensemble de points. Comme pour chaque point vis-à-vis le premier azimuth ($\theta = -180^\circ$) correspond une copie vis-à-vis le dernier ($\theta = 180^\circ$), il suffit de changer parmi les triangles du maillage chaque référence faite à un point copié par une référence au point initial correspondant. Les points copiés, alors devenus inutiles, sont effacés. Le maillage est maintenant cousu et la conversion en cartésien ne présentera aucune discontinuité le long de l'azimuth $\pm 180^\circ$.

4.2.4 Remplissage sous le capteur

Comme le capteur est fixé sur un support lorsqu'on l'utilise, un robot mobile dans notre cas, et que nous devons retirer les points qui constituent ce support (voir section 4.2.1),

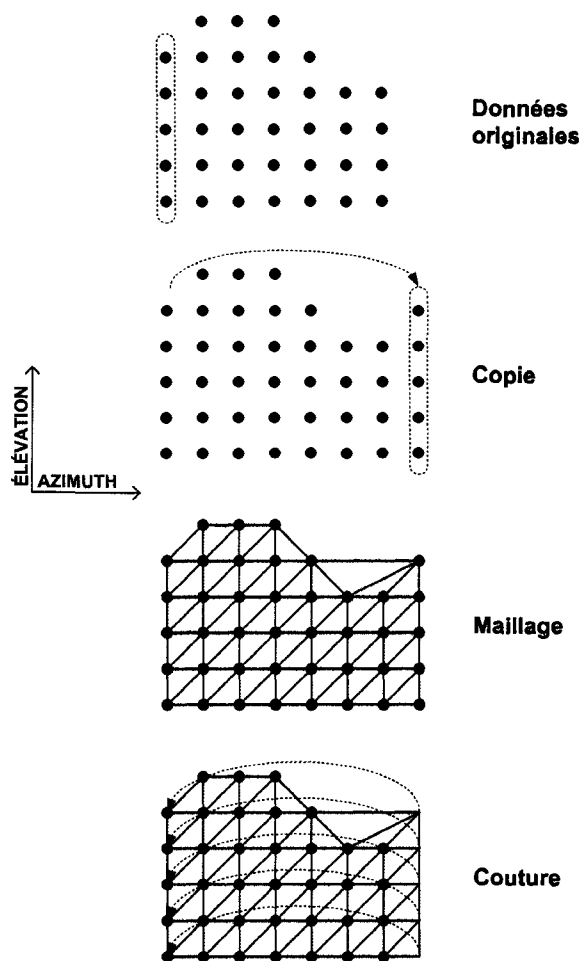


Figure 4.11: Couture d'un maillage

un vide est nécessairement créé sous le capteur. Cet angle mort, dépourvu de données (voir exemple à la figure 4.12), devient un trou dans le maillage. Ceci devient problématique lorsque le maillage est utilisé par les algorithmes subséquents de planification de trajectoire. Effectivement, ces algorithmes supportent difficilement le fait que le robot se retrouve dans un vide du maillage puisque cela empêche l'algorithme de déterminer un point de départ précis.

Afin de contourner le problème, un algorithme de remplissage est implémenté à ce stade. Étant donné que le robot repose nécessairement sur le sol, il est raisonnable de supposer

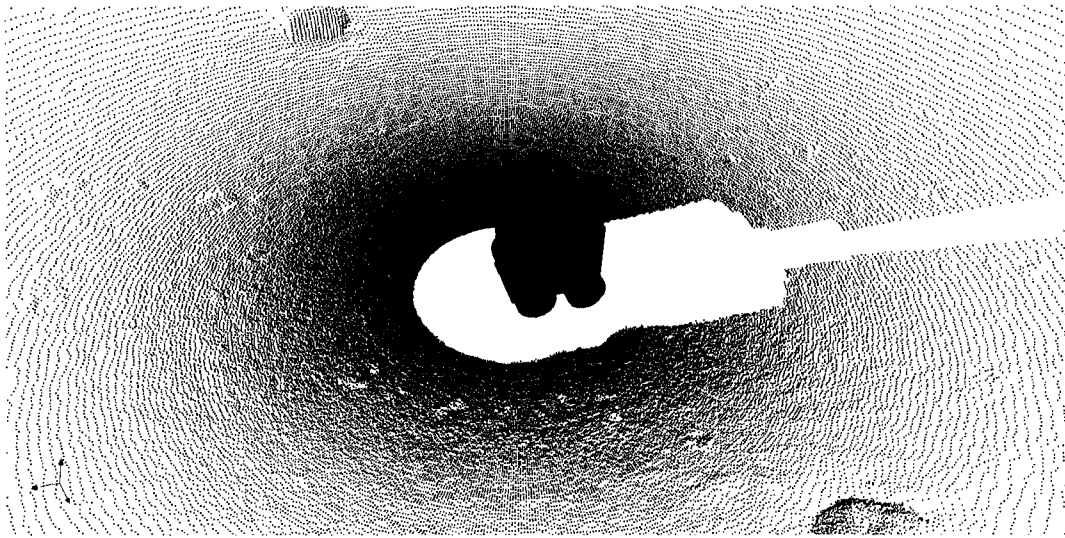


Figure 4.12: Angle mort sous le robot

qu'une surface continue est présente sous celui-ci, bien que cette surface ne soit pas vue directement du capteur. Nous pouvons donc forcer le maillage à remplir cette zone d'angle mort sans craindre de faire une trop grande erreur sur la topologie cachée. La méthode développée est illustrée à la figure 4.13. Avant l'étape de maillage, trois points sont insérés dans les coordonnées sphériques brutes sous la limite physique d'élévation de -90° . Un point est inséré au centre des coordonnées en azimuth (i.e. $\theta = 0^\circ$) et deux aux extrémités ($\theta = -180^\circ$ et $\theta = 180^\circ$ pour un balayage sur un champs de vision de 360°). L'algorithme de maillage est alors exécuté tel quel sur l'ensemble de points résultants. Les références aux deux sommets ajoutés aux extrémités sont ensuite redirigées vers le point central, que l'on nommera point de remplissage (deux triangles non-nécessaires sont éliminés au passage). De là, lors du passage en coordonnées cartésiennes, il suffira de détecter le point de remplissage ($\phi < -90^\circ$) et de forcer les coordonnées cartésiennes de celui-ci à un point fixe situé sous le robot plutôt que de lui appliquer la même conversion qu'aux autres points. Le trou est ainsi rempli (figure 4.14) et les algorithmes de planification de trajectoire pourront aisément déterminer le triangle de départ du robot.

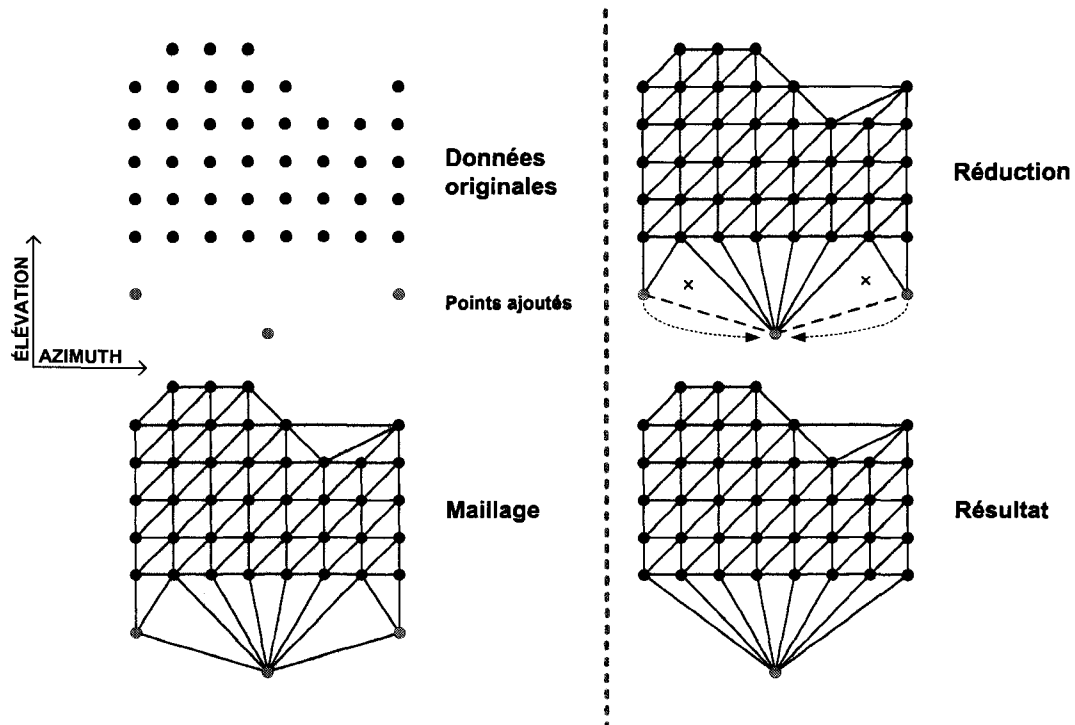


Figure 4.13: Algorithme de remplissage sous le robot

4.2.5 Filtrage des triangles indésirables

À ce stade, l'observation d'un maillage nous montre que ce dernier comporte un certain nombre de triangles superflus. Ces derniers lient certains points de façon à générer une surface continue là où il n'y en a pas en réalité. Ces triangles indésirables peuvent être classés en deux catégories, soit: triangles d'ombres et triangles de frontière.

Triangles d'ombres

Les triangles d'ombres proviennent des discontinuités entre un objet à l'avant-plan et l'arrière-plan (figure 4.15). Dans l'espace de travail de l'algorithme de maillage, les deux points situés de part et d'autre de la discontinuité sont voisins immédiats. L'algorithme les relie donc au sein d'un même triangle, créant une surface continue là où il devrait y avoir un vide. Ces triangles sont typiquement minces et allongés, présentant un angle d'incidence petit par rapport à l'axe allant du point de vue du capteur au triangle en

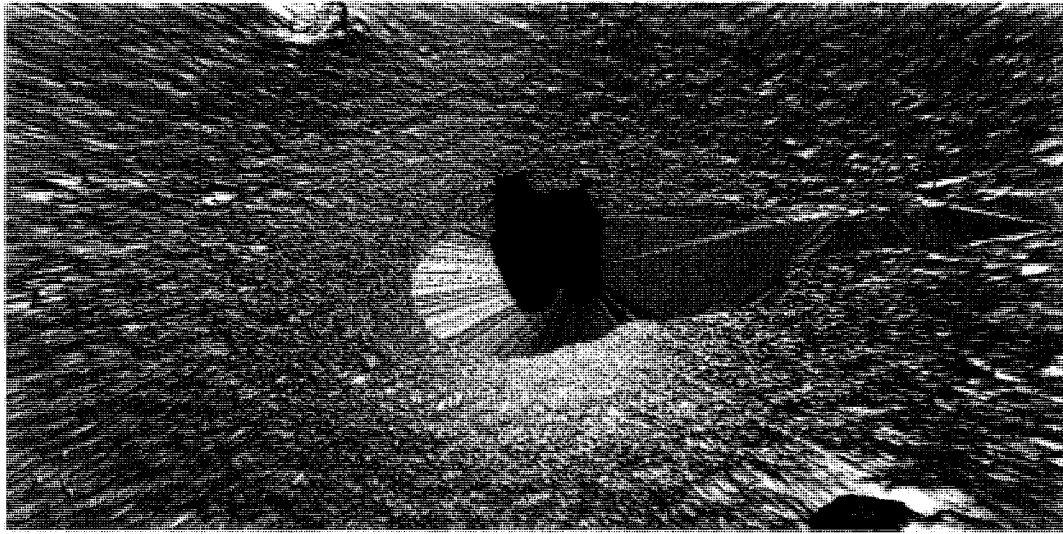


Figure 4.14: Résultat du remplissage

question. La figure 4.16 présente un cas typique où le maillage d'une roche produit des triangles d'ombre derrière celle-ci.

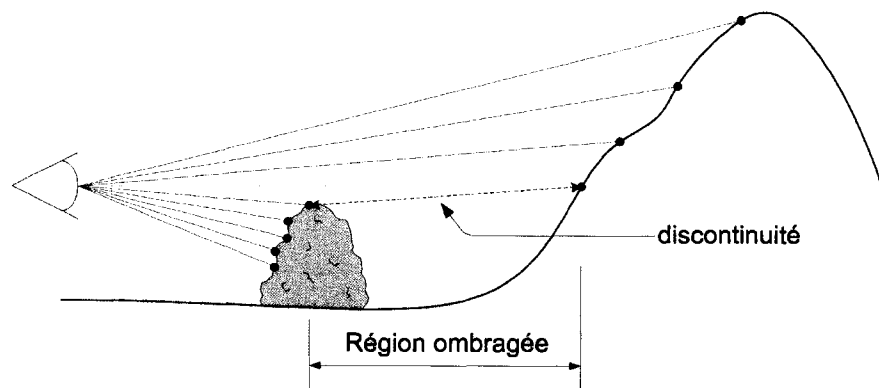


Figure 4.15: Les discontinuités qui produisent les ombres

Triangles de frontière

La triangulation de Delaunay produit une enveloppe convexe. Lorsque la projection du nuage de point sur le plan de maillage $[\theta, \phi]$ contient des portions concaves, l'algorithme remplit ces sections de façon à obtenir un maillage convexe. Il en résulte que les points constituant les bordures de ces sections se retrouvent liés par des triangles que l'on dénomme ici triangles de frontière (ex. triangles marqués d'un "X" sur la figure 4.17).

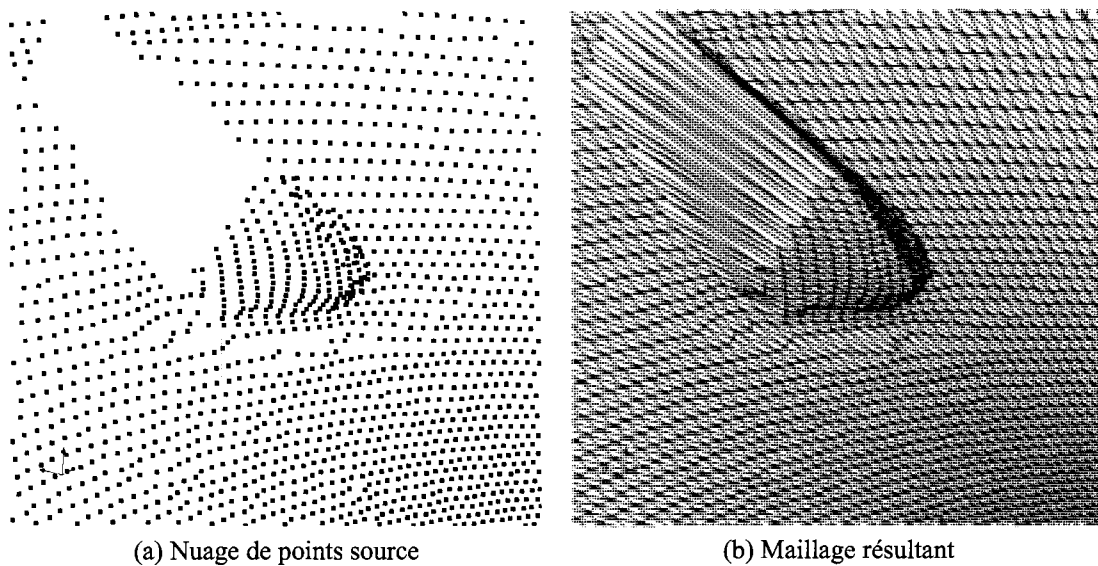


Figure 4.16: Exemple de triangles d'ombre

Une fois les points re-projetés dans l'espace tri-dimensionnel, ces triangles deviennent généralement de grands triangles qui ne représentent aucune surface réelle, tel que montré à la figure 4.18.

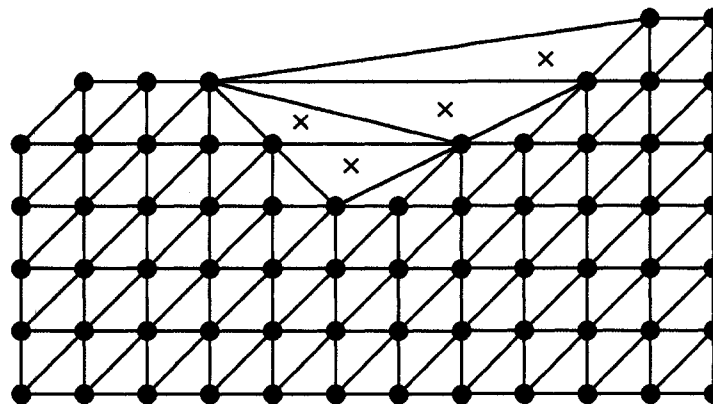
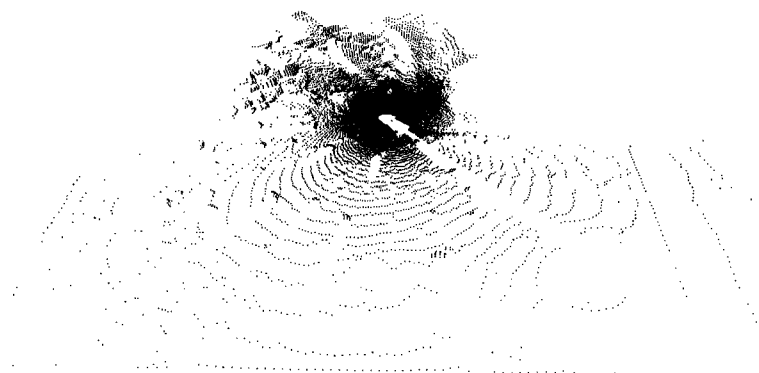
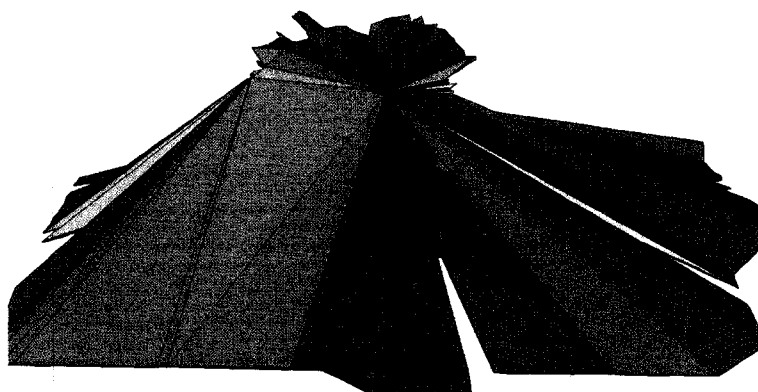


Figure 4.17: Les triangles de frontière dans les bordures concaves

Pour obtenir une représentation adéquate de l'environnement, il est impératif de retirer les triangles d'ombre et de frontière de notre maillage. Autrement, les algorithmes de planification de trajectoires pourraient croire à tort que ces triangles sont navigables



(a) Nuage de points source



(b) Maillage résultant

Figure 4.18: Exemple de triangles de frontière

alors qu'ils ne représentent aucune surface réelle. Notons que outre (Huber and Hebert, 1999), la littérature semble faire peu ou pas référence à ce problème, ni à comment le gérer.

Trois filtres ont été développés ici pour éliminer les triangles indésirables. Les expériences ont montré que bien que chacun de ces filtres soit relativement efficace, aucun n'arrive à éliminer tous les triangles indésirables. La combinaison des trois filtres procure le meilleur rendement, chaque filtre ayant tendance à filtrer une partie des triangles indésirables qui n'ont pas pu être éliminé par les autres.

Seuil sur le rapport de profondeur

Le premier filtre utilisé applique, pour chaque triangle du maillage, un seuil sur le rapport de distance entre le sommet le plus rapproché et le sommet le plus éloigné, par rapport à l'origine du capteur (figure 4.19). Ce filtre est appliqué sur les données brutes puisque les coordonnées sphériques nous procurent directement les distances r pour chaque point. Le ratio de profondeur se définit comme $\frac{r_{min}}{r_{max}}$.

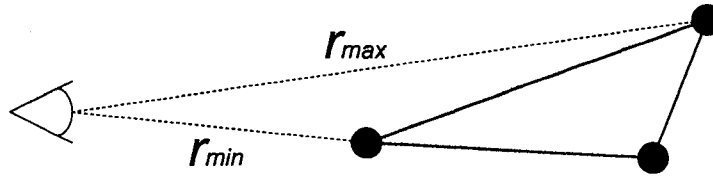


Figure 4.19: Distances minimum et maximum des sommets d'un triangle

Un faible ratio nous indique que le triangle est allongé, caractéristique typique des triangles d'ombre. Les triangles qui présentent un ratio plus petit que le seuil toléré T_{ratio} sont par conséquent rejetés. Les tests initiaux ont démontré que, bien qu'il était possible de déterminer empiriquement un seuil quasi-satisfaisant, ce filtre a tendance à être plus sévère avec les points détectés près du capteur que ceux qui sont plus éloignés. Ceci est principalement dû au bruit dans les mesures de distance, qui a un effet plus marqué sur le ratio lorsque les distances sont petites. Un facteur de décalage D inversement proportionnel à la profondeur moyenne des deux points considérés a donc été intégré au calcul du ratio, de sorte que le filtre devienne

$$\frac{r_{min} + D}{r_{max} + D} \geq T_{ratio} \quad (4.1)$$

où

$$D = \frac{k_{dec}}{\frac{r_{min} + r_{max}}{2}} \quad (4.2)$$

k_{dec} étant une constante déterminé empiriquement. Ce décalage a pour effet d'augmenter

le ratio calculé lorsque les points sont près du capteur, l'effet s'estompant rapidement à mesure que la distance augmente. Dans son implantation courante, les valeurs utilisées pour T_{ratio} et k_{dec} sont respectivement 0.86 et 5.

Seuil sur le périmètre

Le second filtre appliqué vise principalement à éliminer les triangles de frontière. Appliqué une fois que les coordonnées auront été transformées dans l'espace cartésien, ce filtre se base sur le périmètre des triangles. Puisque les triangles de frontière sont généralement de grands triangles comparativement aux “bons” triangles du maillage, l'idée initiale est d'éliminer tous les triangles qui présentent un périmètre plus grand qu'un seuil $T_{perimetre}$. Toutefois, comme la résolution du capteur a un effet direct sur la taille des triangles en général, il n'est pas nécessairement possible de déterminer un périmètre maximum $T_{perimetre}$ qui offrira une performance équivalente peu importe la résolution utilisée. L'approche simple implantée ici compense en multipliant le seuil pré-établi par la résolution verticale du capteur au moment où les données ont été acquises, i.e. la résolution du LMS200, soit $0,25^\circ$, $0,5^\circ$ ou 1° . Le seuil pré-établi est présentement fixé à 15 mètres pour ce filtre.

Seuil sur l'angle d'incidence

Le dernier filtre utilisé applique, pour chaque triangle du maillage, un seuil sur l'angle d'incidence du triangle relativement au point de vue du capteur. Les calculs de ce filtre s'appliquent aussi sur les coordonnées cartésiennes, exprimées dans le référentiel du capteur. La normale \vec{N} de chaque triangle ABC est calculée à l'aide du produit vectoriel des arêtes \vec{AB} et \vec{AC} , tel que représenté à la figure 4.20.

$$\vec{N} = \vec{AB} \times \vec{AC} \quad (4.3)$$

De là, l'angle entre cette normale et la ligne de vue \vec{OA} allant de l'origine de capteur au point A est calculé grâce au produit scalaire. Cet angle constitue le complément de

l'angle d'incidence β recherché. Le filtre préservera seulement les triangles du maillage qui présenteront un angle β plus grand qu'un angle minimum prédéterminé, c'est à dire

$$\beta > T_{angle} \quad (4.4)$$

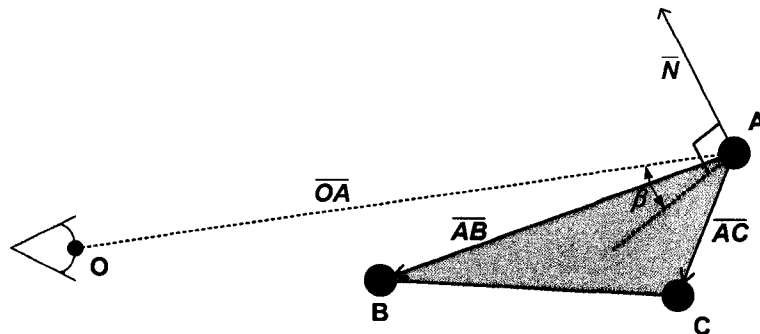


Figure 4.20: Seuil minimum sur l'angle d'incidence

Ce filtre vise principalement les triangles d'ombre, qui le plus souvent présentent un très faible angle d'incidence. Ce filtre a l'avantage de ne pas être affecté par la distance des points ou la résolution du capteur, puisqu'il ne considère que les angles. Le seuil minimum actuellement utilisé est $T_{angle} = 3,6^\circ$.

4.2.6 Conversion en coordonnées cartésiennes

Les coordonnées sphériques brutes produites par le capteur s'avèrent peu commodes à gérer dans les algorithmes subséquents de navigation autonome. Une fois le maillage complété, les points sont donc convertis en coordonnées cartésiennes.

Afin de minimiser les moments de forces générés par le télémètre sur la plate-forme rotative, la plaque de support a été conçue de façon à aligner autant que possible le centre de masse du télémètre avec l'axe de rotation de la plate-forme. Bien que ceci optimise le comportement dynamique de l'ensemble, un léger décalage de l'origine optique du

télémètre par rapport à l'axe de pivot est généré, puisque l'origine optique ne coïncide pas avec le centre de masse (figure 4.21). Par conséquent, l'origine de mesure, par rapport à laquelle les coordonnées sphériques brutes sont exprimées, se déplace autour de l'origine du référentiel cartésien lorsque la plate-forme pivote.

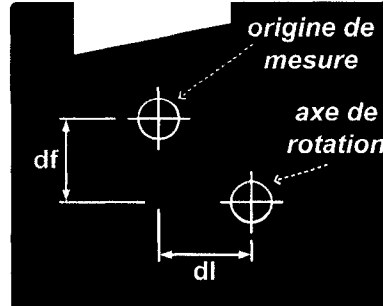


Figure 4.21: Représentation du décalage entre le point de mesure et l'axe de pivot

La figure 4.22 présente la géométrie (non à l'échelle) associée aux décalages latéral d_l et frontal d_f du point de mesure par rapport à l'origine cartésienne O , située sur l'axe de rotation. De là, on comprend que les coordonnées cartésiennes (x, y, z) d'un point P sont obtenues à partir des coordonnées sphériques brutes (θ, ϕ, r) via les relations suivantes:

$$x = (r \cos \phi + d_f) \cos \theta + d_l \sin \theta \quad (4.5)$$

$$y = d_l \cos \theta - (r \cos \phi + d_f) \sin \theta \quad (4.6)$$

$$z = r \sin \phi \quad (4.7)$$

Les mesures d_l et d_f sont déterminées par le design de la plaque de support. Le design courant fixe d_l et d_f à 35,4 mm et 42,2 mm respectivement.

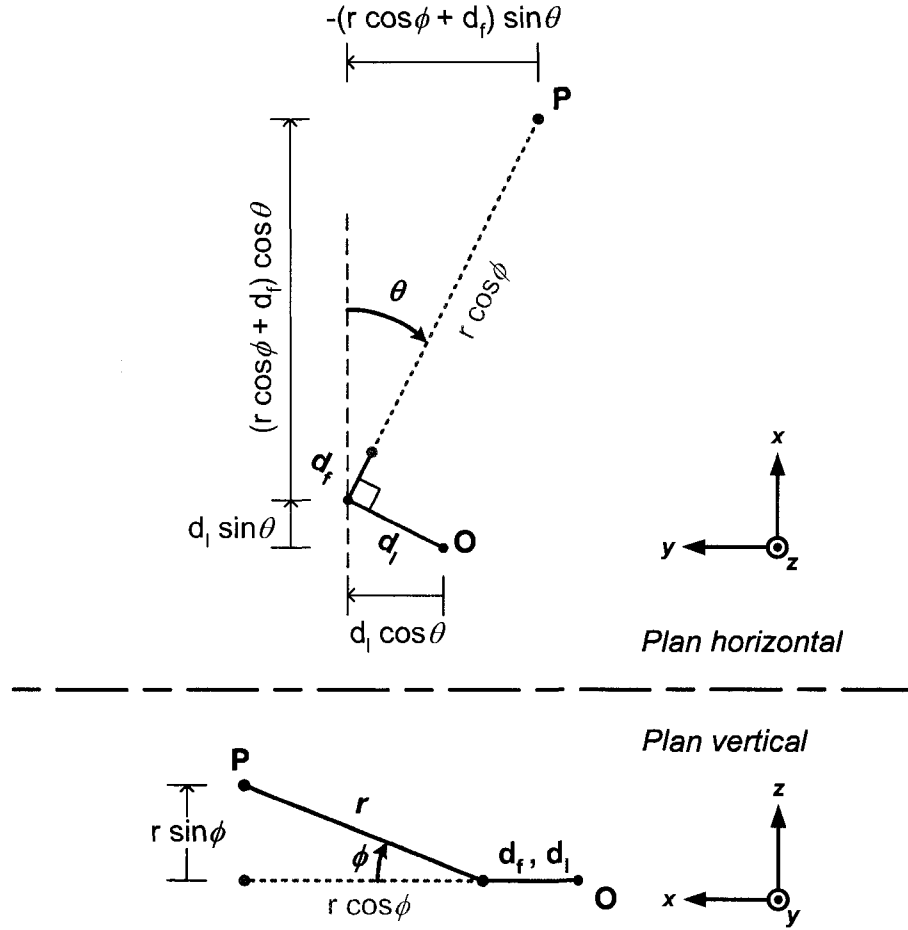


Figure 4.22: Conversion des coordonnées sphériques en cartésien

4.3 Traitement logiciel subséquent

À ce stade, le travail du capteur est terminé et la console client dispose d'un maillage complet et adéquat de l'environnement. L'étendue du projet présenté ici est donc couverte en totalité. De là, l'architecture de navigation autonome présentement utilisée par l'ASC (Dupuis et al., 2008) adoucit et décime le maillage afin de réduire l'espace mémoire et le temps requis lors des traitements subséquents. Les bibliothèques de VTK (Kitware, 2008) procurent ici aussi les algorithmes qui exécutent l'adoucisement et la décimation. Tel qu'illustré précédemment à la figure 2.1, le maillage sera alors utilisé par

l'engin d'autonomie du robot pour localiser ce dernier et faire la planification de trajectoire. La planification de trajectoire se fait en interprétant le maillage triangulaire comme un graphe, tel que résumé au chapitre 2. Alors que l'implantation initiale avait recours à l'algorithme de Dijkstra pour exécuter la recherche dans le graphe, le fait d'obtenir un ensemble de données sur 360° rend cet algorithme beaucoup moins efficace en fait de temps de calcul. La morphologie des graphes générés à partir de données étalées sur 360° fait que Dijkstra parcourt dans bien des cas une grande quantité de noeuds inutilement. Le recours à l'algorithme A* permet d'orienter les recherches vers la cible grâce à une heuristique basée sur la distance euclidienne. Ceci accélère de façon substantielle la recherche, de un à deux ordres de grandeur dans certains cas observés.

Les données acquises sont sauvegardées en mémoire mais à l'heure actuelle il n'y a pas de structure implantée visant la mise en correspondance d'un balayage à l'autre. Dans une infrastructure future, nous pourrions imaginer voir les données du maillage intégrées à un atlas afin d'accumuler la cartographie détaillée des zones visitées par le robot.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS ET ANALYSES

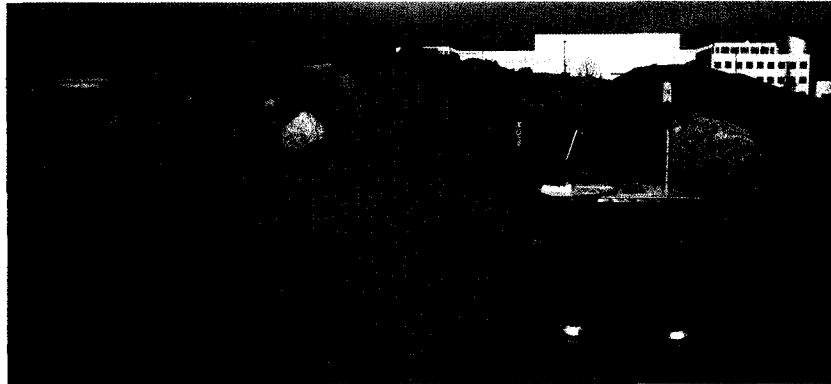


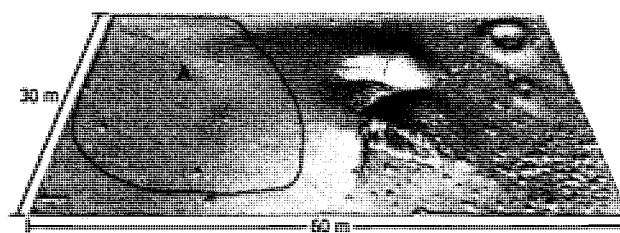
Figure 5.1: MRT muni du FCL sur le terrain de Mars de l'ASC

5.1 Exemples de balayages

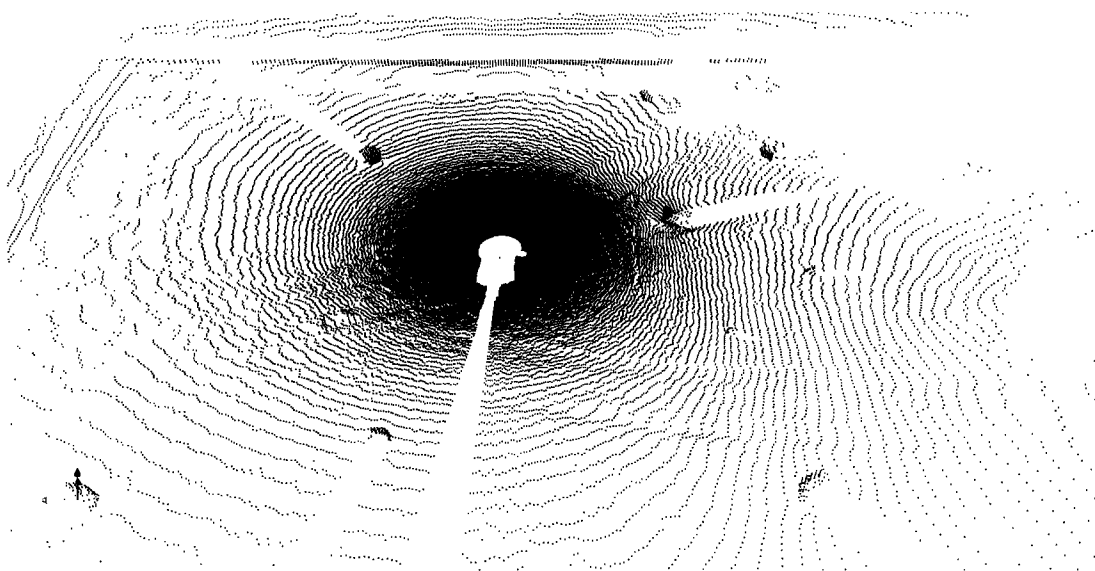
Cette section présente quelques exemples de données recueillies par le capteur FCL ainsi que les maillages résultants qui ont été produit. Les balayages ont tous été exécutés sur le terrain martien de l'ASC. La figure 5.2 indique approximativement les endroits d'où les balayages présentés aux figures 5.3 à 5.6 ont été exécutés. La figure 5.7 présente des vues rapprochées du maillage autour du robot.



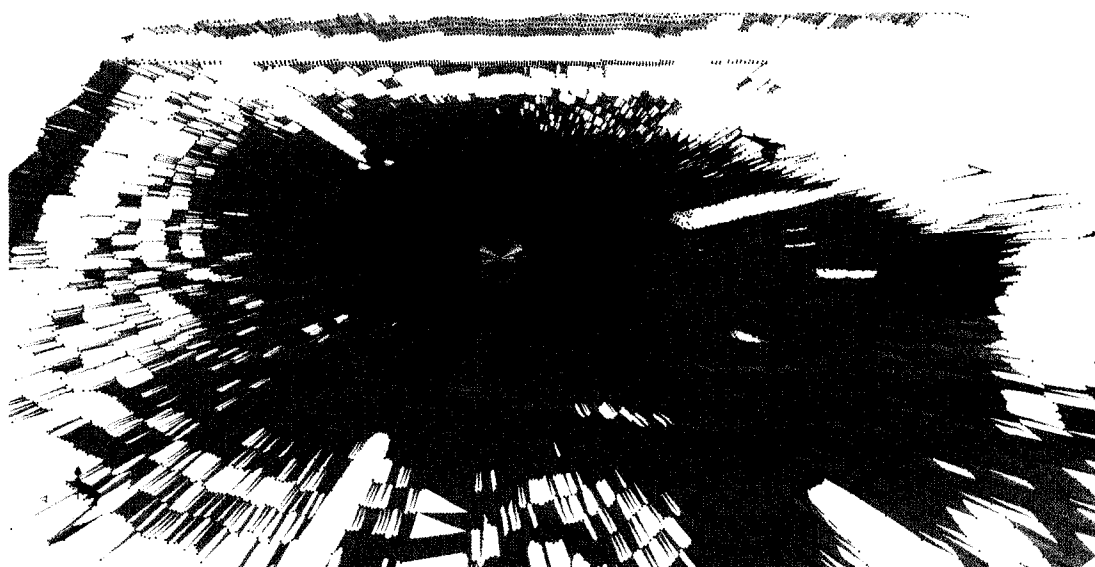
Figure 5.2: Localisation des balayages sur le terrain de Mars de l'ASC



(a) Région balayée

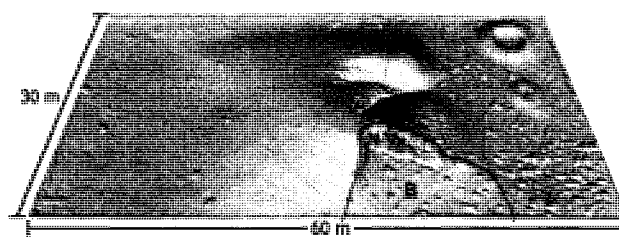


(b) Points mesurés

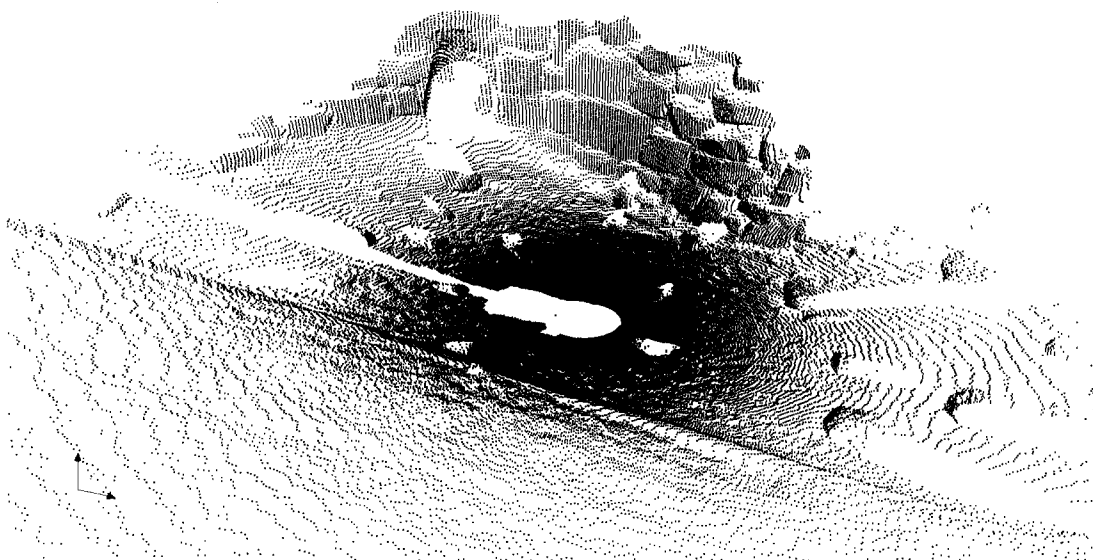


(c) Points superposés au maillage

Figure 5.3: Balayage de la plaine (position A)



(a) Région balayée

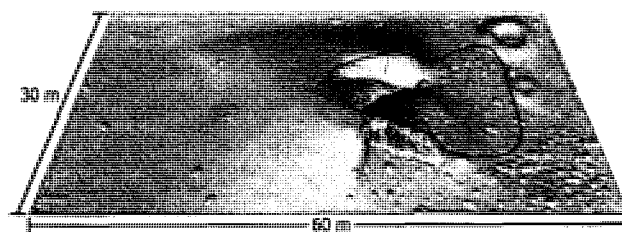


(b) Points mesurés

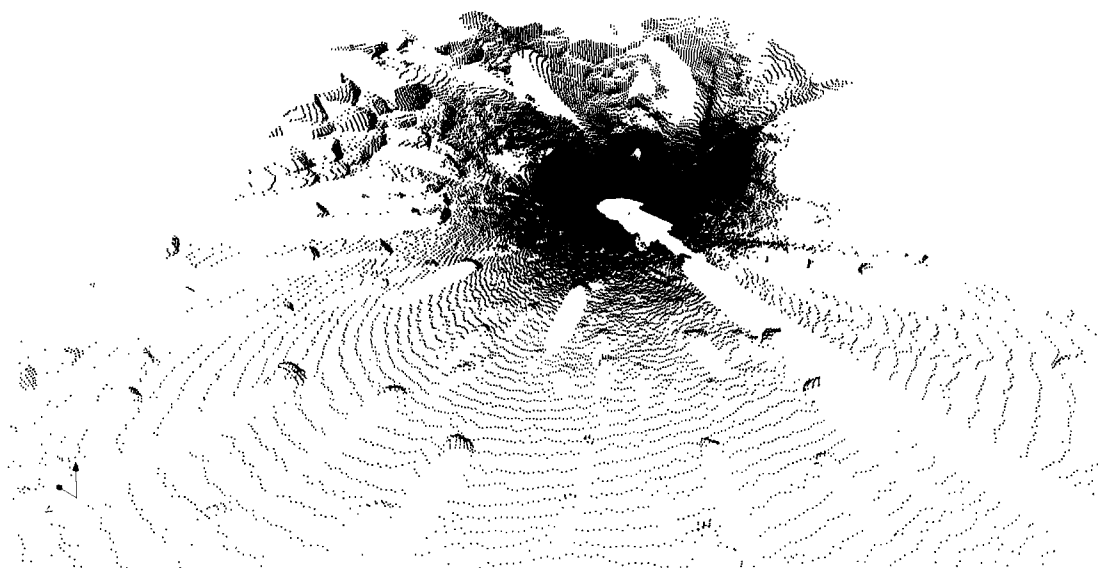


(c) Points superposés au maillage

Figure 5.4: Balayage de la falaise (position B)



(a) Région balayée

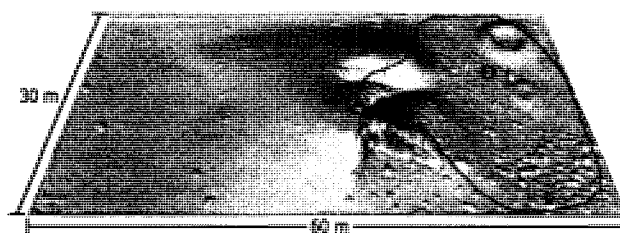


(b) Points mesurés

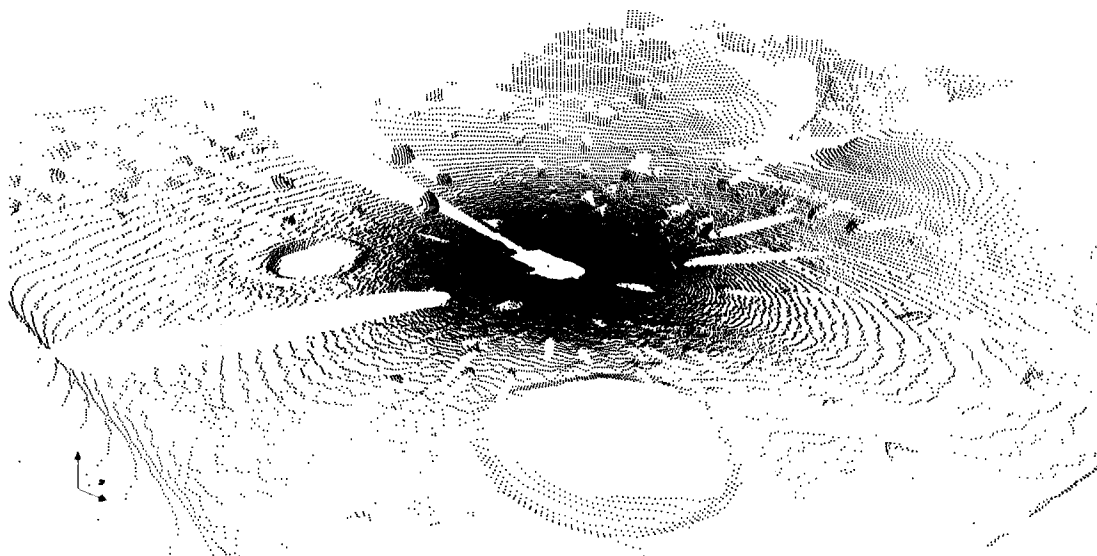


(c) Points superposés au maillage

Figure 5.5: Balayage de l'entrée du canyon (position C)



(a) Région balayée



(b) Points mesurés

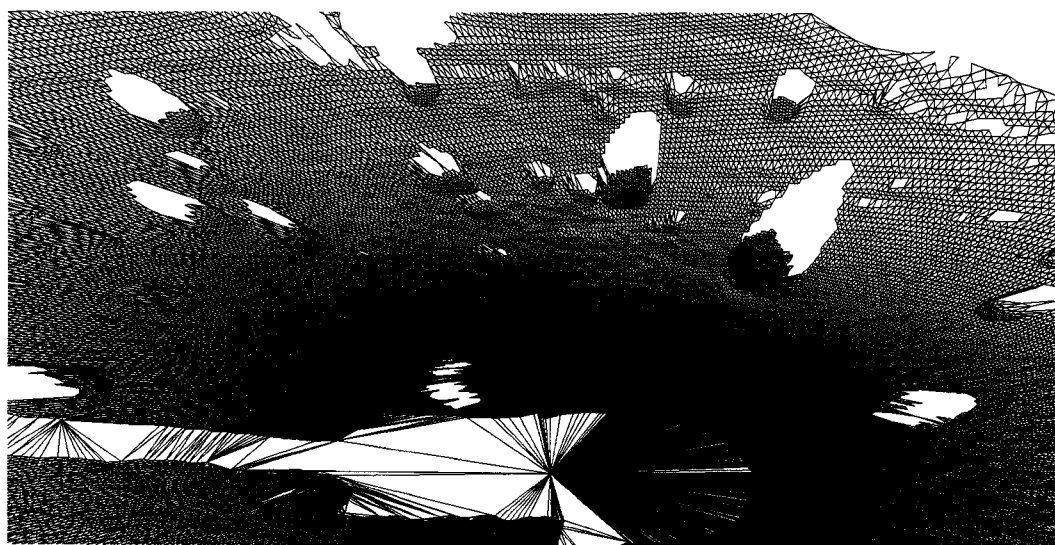


(c) Points superposés au maillage

Figure 5.6: Balayage de la région des cratères (position D)



(a) Falaise (position B)



(b) Roches (position D)

Figure 5.7: Vues rapprochées de maillages, représentation en fil de fer

5.1.1 Balayage d'une scène connue

Les figures 5.8 et 5.9 exposent le résultat du balayage d'une scène connue à un peu plus de 3 mètres du capteur. Les données acquises par le capteur ont été maillées puis recalées sur le modèle 3D de la scène afin de valider l'ensemble du processus de mesure et de traitement des données. Une très bonne correspondance existe entre les données et le modèle 3D. Les surfaces arrondies de la sphère et du cylindre sont par contre légèrement déformées par rapport au modèle. Le cylindre est quelque peu aplati et la sphère présente une structure en forme de cratère. (Ye and Borenstein, 2002) ont mesuré et démontré que l'angle d'incidence, la réflectivité et la couleur d'une cible avaient un impact à divers degrés sur les mesures du télémètre SICK. Les déformations observées ici découlent vraisemblablement de la variation de l'angle d'incidence le long des surfaces courbes, la boîte plane ne présentant aucune déformation particulière. Le fait que les axes centraux de ces déformations soient orientés vers l'origine du capteur vient appuyer cette idée. Un second balayage de la même scène, pris d'un angle différent, exhibe le même type de déformations, toujours orientées vers l'origine du capteur.

Le ballon est constitué d'un matériel à l'aspect métallique relativement réfléchissant, ce qui influence aussi les mesures. Une manifestation de l'effet de la réflectivité se constate, toujours sur la figure 5.9, par les lignes de signalisation orange au sol qui produisent des points légèrement surélevés par rapport aux points acquis sur l'asphalte nu.

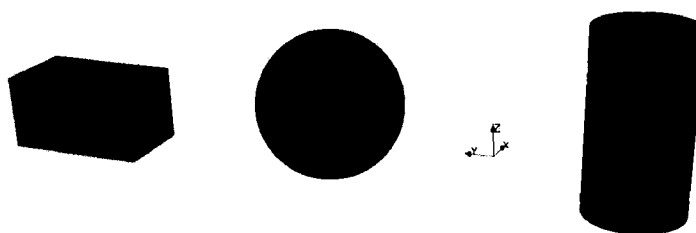
5.2 Performances

5.2.1 Répétabilité

Afin d'obtenir un indice sur la répétabilité du capteur, deux manipulations ont été faites. En un premier temps, les points constituant le devant de la boîte dans le nuage de points

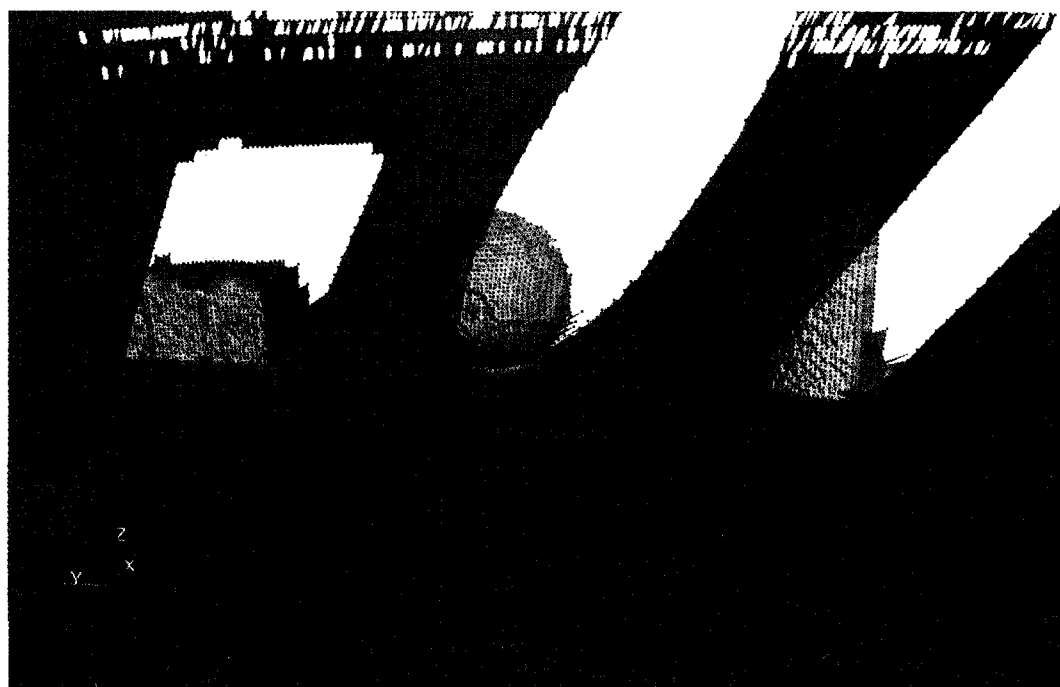


(a) Montage expérimental



(b) Modèle 3D de la scène

Figure 5.8: Acquisition d'une scène connue



(a) Nuage de points mesurés et maillage résultant



(b) Maillage recalé sur le modèle 3D

Figure 5.9: Recalage des données maillées sur le modèle 3D d'une scène connue

de la scène connue ont été extraits, tel qu'identifiés à la figure 5.10. Le plan moyen correspondant à cet ensemble de 716 points a été calculé par la méthode des moindres carrés (figure 5.11). Dans une situation parfaite, tous les points se retrouveraient sur ce plan. La figure 5.12 montre la distribution statistique de la distance entre les points extraits et le plan moyen. Ce graphique affiche la distribution par des bandes couvrant $\frac{1}{2}\sigma$ chacune. L'erreur moyenne des points par rapport au plan est de 4,4 mm avec un écart type de 3,9 mm. Cette mesure de l'erreur respecte l'erreur statistique de 5 mm pour une plage de 0 à 8 m avancée par le manufacturier du télémètre dans (SICK, 2006).

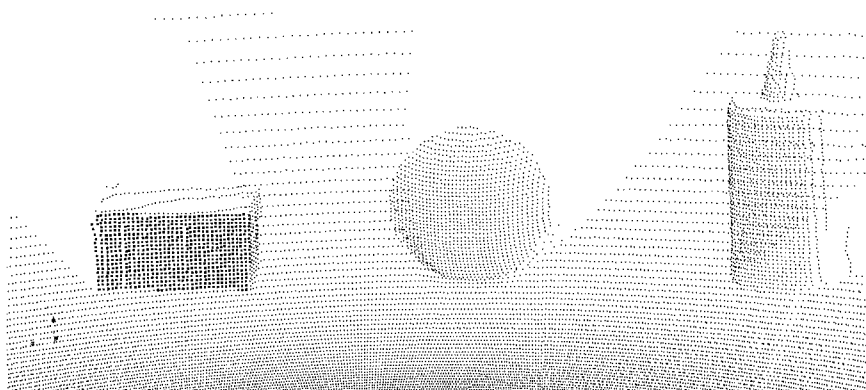


Figure 5.10: Points extraits, devant de la boîte

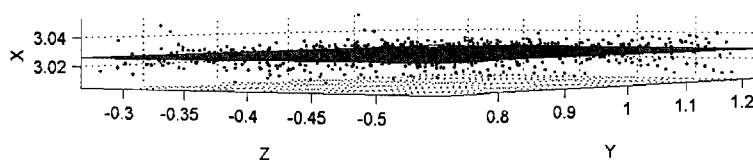


Figure 5.11: Plan moyen (X, Y, Z en mètres)

Le second test effectué est la comparaison de deux balayages successifs de la même scène sous des conditions identiques. L'expérience a été exécutée dans un laboratoire intérieur (figure 5.13). Une comparaison point à point nous donne une certaine indication de la répétabilité du capteur. Les résultats de la comparaison sont réunis au tableau 5.1. Les deux balayages ont été pris à résolution "normale", tel que défini subséquentement au tableau 5.2. En retirant les mesures où le capteur n'a pas détecté de retour de signal, on

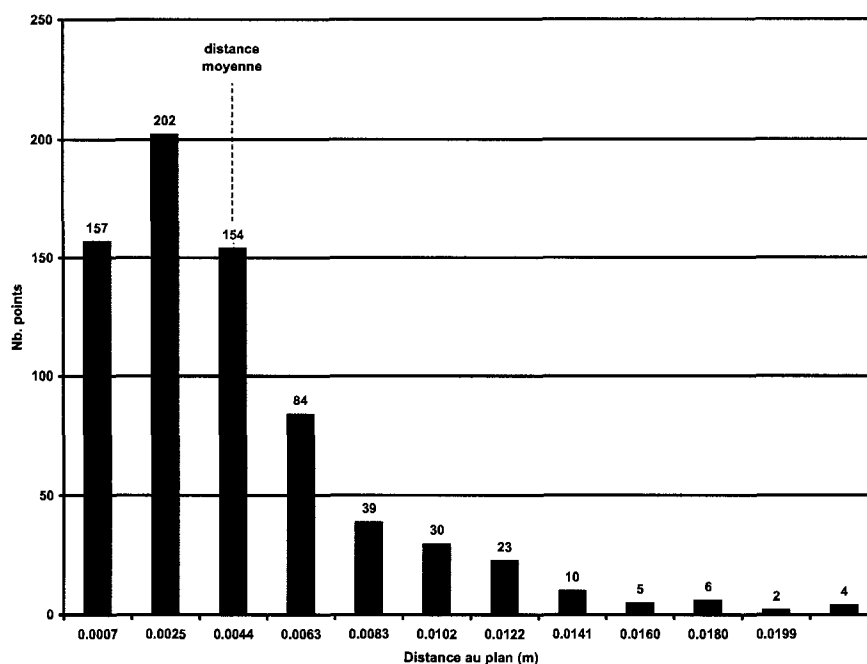


Figure 5.12: Distribution des distances des points par rapport au plan moyen

se retrouve à comparer deux balayages de 112577 points chacun sur une plage s'étalant de quelques centimètres à un peu plus de 30 mètres du capteur. La mise en correspondance des points du premier balayage avec ceux du second est basée sur l'index des points recueillis. Sous la forme sphérique initiale, l'ordre des points est préservé d'un balayage à l'autre. Les points situés au même index visent par conséquent les mêmes consignes d'orientation en azimuth et élévation. Les mesures en élévation étant définies par le télémètre à intervalles fixes de $0,25^\circ$, $0,5^\circ$ ou 1° , il n'est pas possible de comparer celles-ci puisqu'elles sont nécessairement toujours identiques. Il est par contre possible de mesurer les différences de positionnement de la plate-forme rotative (i.e. l'azimuth θ) puisqu'on obtient directement celles-ci dans les coordonnées brutes. De leur côté, les coordonnées cartésiennes ont été utilisées pour calculer les distances point à point dans l'espace. Les cas où une différence en azimuth existe entre deux points correspondant a donc un impact direct sur la distance cartésienne point à point. Dans l'exemple présenté, quelques cas que l'on pourrait qualifier de "pathologiques" affichent des dis-

tances point à point de plusieurs mètres, ce qui explique la distance maximale de plus de 16 mètres. Ces cas présentent typiquement une certaine différence en azimuth. Ce sont donc vraisemblablement des cas où un balayage a frappé le coin d'un obstacle alors que le second, décalé d'une infime fraction de degré en azimuth ou en élévation, est passé à côté de l'obstacle pour aller détecter l'arrière-plan de la scène. La moyenne des distances point à point reste très basse avec 1,1 cm. Soulignons que seulement 0,48% des points affichent une différence supérieure à 5 centimètres d'un balayage à l'autre et que similairement, 97,35% des points sont à moins de 2,5 centimètres l'un de l'autre. De plus, la scène de laboratoire balayée présente un encombrement élevé avec ses nombreux chemins de câble, barrières, montages expérimentaux, mobilier et structures diverses. Ceci constitue un environnement plus complexe que les environnements extérieurs typiques visés par les scénarios de navigation autonome.

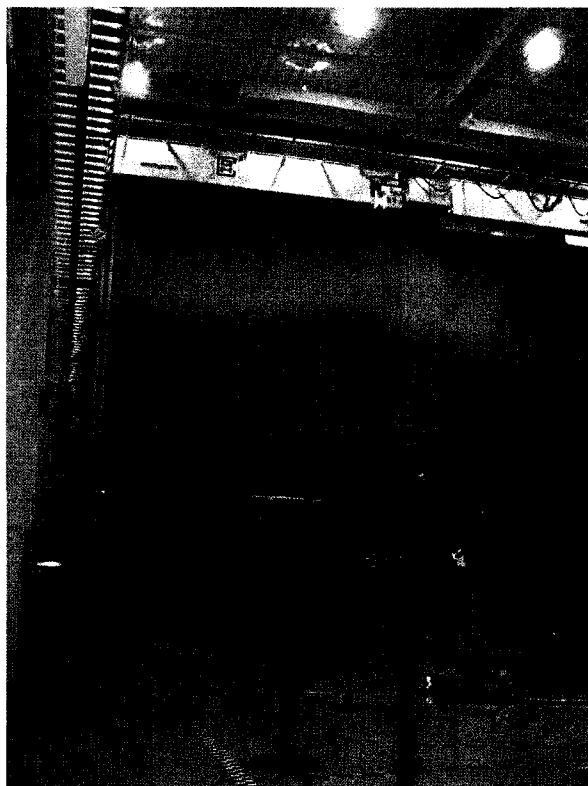


Figure 5.13: Balayage en laboratoire

Tableau 5.1: Comparaison de deux balayages d'une même scène intérieure

Nb. de points: 112577	
<i>Différences en azimuth ($\Delta\theta$)</i>	
Minimum	0.000°
Maximum	0.012°
Moyenne	0.00315°
Écart type	0.00299°
<i>Distances points à points</i>	
Minimum	0.000 m
Maximum	16.325 m
Moyenne	0.011 m
Écart type	0.148 m
< 2.5 cm	97.35% des points
< 5.0 cm	99.52% des points

5.2.2 Vitesse d'acquisition

La configuration actuelle permet l'acquisition des données et le transfert de celles-ci à la console client avec un débit global d'environ 500 à 600 points à la seconde. Ainsi, le temps requis pour effectuer un balayage est fonction du nombre de mesures que le capteur doit effectuer, i.e. le produit du nombre de coordonnées en azimuth par le nombre de coordonnées en élévation. Par exemple, l'acquisition d'un balayage complet (i.e. sur 360° en azimuth) à une résolution "normale" requiert 129960 mesures (360×361) alors qu'un balayage complet à résolution "élevée" prendra 288720 mesures (720×401). Le tableau 5.2 détaille les paramètres typiques utilisés pour ces deux résolutions.

Tableau 5.2: Comparaison des paramètres de balayages à résolution normale et élevée

		Normale	Élevée
Azimuth	Champ de vision	360°	360°
	Résolution	1°	0,5°
Élévation	Champ de vision	180°	100°
	Résolution	0,5°	0,25°
nb. de mesures		129960	288720

À moins d'être dans un environnement fermé comme une grotte, le nombre de points

en finale sera souvent moins que la moitié du nombre de mesures. Ceci est dû au fait que lorsque le télémètre mesure une zone où aucun obstacle ne figure à l'intérieur de sa portée maximale (ex. le ciel), ce dernier retourne une distance ayant la valeur maximale possible (dans la configuration courante: 32,767 m). Sachant qu'à cette distance ce n'est pas un obstacle mais bien la limite de perception du capteur, ces mesures sont éliminées du lot. Autrement, ces mesures reproduiraient une sphère de rayon égal à la limite de perception du télémètre.

Une fois les données acquises et transmises à la console client, le traitement logiciel décrit au chapitre précédent est appliqué. Pour les résolutions "normale" et "élevée" typiquement utilisées, les étapes de maillage, filtrage et conversion en coordonnées cartésiennes prennent au total une période de temps de l'ordre du temps requis pour faire l'acquisition. La triangulation de Delaunay qui produit le maillage est l'opération la plus coûteuse en temps puisqu'elle s'exécute en $O(n \log n)$ (Leach, 1992). Les algorithmes de filtrage et de conversion sont d'ordre $O(n)$.

5.2.3 Consommation

Au niveau de la puissance consommée, le capteur tire environ 800 mA @ 24 V lorsqu'il est en attente, soit 19,2 W. En cours de balayage, des pointes momentanées d'environ 900 mA (21,6 W) se produisent alors qu'en déplacement continu à grande vitesse de la plate-forme rotative, des pointes d'un peu moins de 1200 mA (28,8 W) ont été observées. La consommation continue en utilisation normale a été mesurée à environ 20 W. Celle-ci est principalement attribuable au télémètre laser, les consommations du micro-contrôleur et du moteur de la plate-forme rotative étant négligeables la plupart du temps.

L'implantation courante utilise un convertisseur DC-DC pour générer la source 24 V nécessaire à partir des piles 12V du robot mobile (voir section 3.4). L'efficacité du

convertisseur utilisé est spécifiée à 84%. Ainsi, si l'on considère ce convertisseur dans le bilan de puissance, la puissance totale continue demandée au robot dans la configuration actuelle ne dépasse pas la barre des 25W.

5.2.4 Masse

La masse totale du capteur est de l'ordre de 7 kilogrammes, alors que l'ensemble de l'électronique se situe aux alentours des 500 grammes. Le tableau 5.3 présente une distribution approximative de la masse parmi les composants.

Tableau 5.3: Répartition de la masse parmi les composants

Capteur	
Télémètre SICK LMS200	4,50 kg
Plate-forme rotative Newmark RM-3	1,36 kg
Moteur Animatics SM1720D85D	0,55 kg
Plaque de support	0,38 kg
Électronique	
Boîtier + électronique	0,260 kg
Câblage (estimé)	0,125 kg
Convertisseur DC-DC (12V → 24V)	0,130 kg

5.2.5 Précision

Au niveau de la précision du télémètre, comme le LMS200 est un capteur répandu, la littérature offre d'emblée une bonne quantité d'information à son sujet, comme (Tuley et al., 2005a). (Ye and Borenstein, 2002) est un exemple qui présente la caractérisation étendue de plusieurs paramètres de ce capteur. Les auteurs y quantifient entre autre l'effet sur les mesures de la dérive, de la propriété des surfaces et de l'angle d'incidence. Un point majeur qui en ressort est que la dérive thermique a un effet important au cours des trois premières heures suivant la mise sous tension, avec des fluctuations sur les

mesures allant jusqu'à 8 mm. Après cette période, les fluctuations dues à la dérive ne dépassent guère 2 mm. On y trouve aussi que les propriétés des surfaces (réflectivité, couleur, ton de gris) n'ont presque pas d'effet sur la moyenne des mesures mais, jouent plutôt sur les distributions de celles-ci (excepté la couleur). Quant à l'angle d'incidence, à plus de 20° ce paramètre est celui qui a le plus d'impact sur la moyenne des mesures. Quantitativement, les erreurs maximales rencontrées sont dites de l'ordre de 17 mm, toutes conditions confondues. Cette valeur est relativement proche du ± 15 mm tiré des spécifications du capteur pour la plage de 1 à 8 m (voir tableau 3.1). En ce qui concerne la résolution angulaire en élévation, la résolution maximale de 0,25° du télémètre correspond à une résolution de 4,3 cm à 10 m de distance et 13,1 cm à 30 m.

Du côté de la plate-forme rotative, l'encodeur optique du moteur a une résolution de 500 pulsations/tour, donc 2000 incréments/tour une fois interprété par le décodeur de quadrature. La plate-forme de son côté offre un découplage de 90:1, ce qui produit au total 180 000 incréments/tour en sortie, soit une résolution de 0,002° en azimuth. À 10 m de distance, ceci résulte en une résolution tout juste sous les 0,7 mm alors qu'à 30 m la résolution sera de 2,1 mm. La répétabilité de la plate-forme est spécifiée à 5 arc-secondes, soit environ 0,001389°, donc 0,48 mm à 10 m et 1,45 mm à 30 m.

5.2.6 Coûts

Comme tout produit en développement, les coûts liés au temps de la main d'oeuvre nécessaire à la conception du premier prototype s'avèrent importants, souvent plus élevés que le coût du matériel. Ces coûts de développement ne sont volontairement pas considérés ici dans l'estimation des coûts, d'une part parce qu'il sont difficiles à quantifier dans l'environnement de recherche présent, et d'autre part parce que la fabrication de capteurs supplémentaires n'exigerait maintenant plus vraiment d'effort de conception. Le tableau 5.4 fait la liste des coûts d'achats des éléments principaux. La somme se

chiffre à un peu plus de 10 000\$, excluant le coût de la plaque de support qui a été usinée sur place par l'atelier de fabrication de l'ASC.

Tableau 5.4: Répartition des coûts parmi les composants (\$ CAN)

Télémètre SICK LMS200	7000 \$
Plate-forme rotative Newmark RM-3	1450 \$
Moteur Animatics SM1720D85D	1300 \$
Plaque de support	fait par l'ASC
Électronique, câblage et autres	600 \$

5.2.7 Sommaire des avantages et limitations

Le capteur développé présente plusieurs avantages et certaines limitations vis-à-vis les capteurs terrestres 3D disponibles commercialement. La comparaison se fait évidemment ici sous l'optique de la robotique mobile autonome dans un contexte de recherche.

Le premier avantage est probablement celui du coût, qui est ici de l'ordre de 5 à 15% du coût des capteurs commerciaux qui balaient sur deux axes. C'est probablement ici un des arguments majeurs qui pousse plusieurs équipes de recherche à construire leur propre capteur. Bien que le capteur FCL ne représente pas une solution à priori toute faite, l'effort de conception matérielle reste petit grâce à l'utilisation de composants disponibles commercialement. Rappelons que seule la plaque de support du télémètre a dû être conçue sur mesure.

Les télémètres 3D commerciaux inventoriés dans l'étude (POB, 2007) présentent des masses variant de 10 kg à plus de 19 kg, la majorité se situant dans la plage 13-15 kg. Avec une masse de l'ordre du 7,5 kg en incluant l'électronique, le FCL présente un avantage certain lorsqu'on considère un robot mobile de taille modeste.

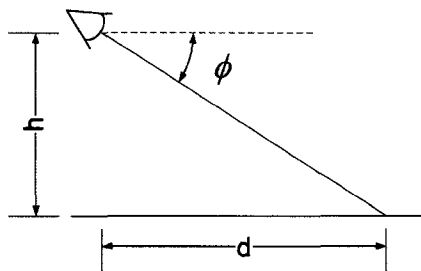
Dans la même veine, les mêmes télémètres commerciaux affichent en général des consommations de l'ordre de 50 à 80 W alors que le FCL ne consomme que 20 W, un autre

avantage important pour notre application.

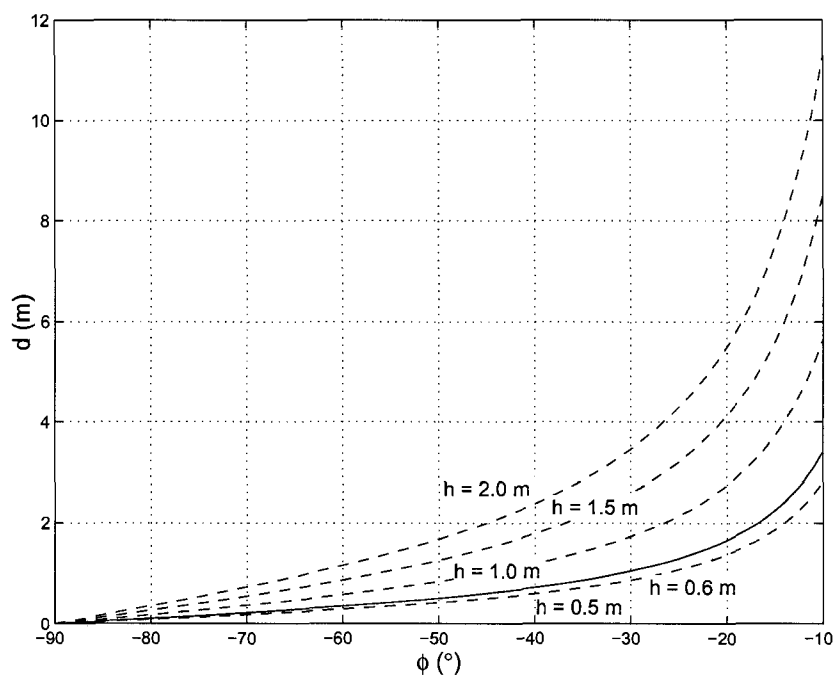
À titre indicatif, alors qu'en 2006 le robot mobile de l'ASC était incapable de transporter le lidar Ilris-3D (Optech), ni de lui fournir suffisamment de puissance, le capteur développé ici a pu être installé en permanence sur ce même robot grâce à sa masse plus petite et sa consommation plus faible.

En contre-partie d'une masse et d'une puissance réduite, on obtient néanmoins une portée réduite. Nombre de télémètres 3D dédiés aux relevés terrestres offrent des portées de quelques centaines de mètres, voir un peu plus d'un kilomètre dans certains cas. Dans notre cas, le télémètre utilisé offre une plage maximale de 80 mètres, mais est cependant utilisé en configuration 32 mètres puisque cette plage offre une résolution d'un ordre de grandeur meilleure. Il reste qu'en pratique, puisque le lidar est relativement près du sol dans notre application, cette plage demeure satisfaisante. À cause de la résolution angulaire constante du télémètre, à plus de 10 ou 15 mètres du capteur le nuage de point devient généralement trop clairsemé pour produire une représentation fiable de l'environnement. On voit clairement cet effet aux figures 5.2 à 5.6. L'idéal pour réduire cet effet de résolution variable décroissante serait d'installer le lidar plus haut, augmentant ainsi l'horizon de ce dernier. La figure 5.14 schématise la distribution des points au sol en fonction de l'angle d'élévation pour différentes hauteurs. On constate qu'en augmentant la hauteur, les points se retrouvent distribués sur une plus grande distance pour une même plage d'orientation (i.e. la pente de la courbe est plus élevée). Ainsi, la résolution à courte distance diminue au profit d'un horizon plus étendu. La courbe pleine y représente la configuration actuelle sur le robot de l'ASC.

Le champs de vision complet sur 360° en azimuth constitue un avantage majeur dans la planification de trajectoire. Cette caractéristique évite d'avoir à recalculer plusieurs balayages successifs pour obtenir une vue d'ensemble complète de l'environnement du robot. Les expériences en navigation autonome exécutées au cours de la saison



(a) Définition des paramètres



(b) Distance vs. élévation

Figure 5.14: Répartition des points au sol selon la hauteur du capteur

estivale 2007 (Dupuis et al., 2008) ont su démontrer cet avantage, surtout lorsque l'environnement présente beaucoup d'obstacles. Le grand champ de vision en élévation (100° ou 180° selon la résolution) est aussi bénéfique puisqu'il permet de détecter l'environnement dans le voisinage immédiat du robot.

La modularité du système est un autre facteur qui facilite l'intégration du capteur à un système robotique existant. L'interface réseau standard TCP-IP procure une connection flexible vers la console client, que ce soit une connection directe ou passant par une infrastructure réseau plus complexe (avec ou sans-fil). Du côté du logiciel qui reçoit et traite les données sur la console client, bien que les algorithmes aient été codés dans l'infrastructure logicielle de navigation autonome de l'ASC, ceux-ci restent modulaires. Codés en JAVA, ils pourraient donc être portés sur différents systèmes d'exploitations de façon transparente.

Du côté des limitations, notons qu'avec une vitesse d'acquisition de l'ordre de 500 à 600 points/seconde, le capteur FCL offre une performance raisonnable mais sujette à l'amélioration. Bien qu'il serait souhaitable d'accélérer le processus dans l'avenir, le contexte d'exploration planétaire peut à l'heure actuelle s'accomoder du délai de quelques minutes requis pour exécuter un balayage de l'environnement.

Finalement, bien que le pas angulaire en azimuth puisse en théorie être fixé de façon quasi arbitraire (à $0,002^\circ$ près), le pas angulaire en élévation de son côté ne peut prendre que trois valeurs pré-définies ($0,25^\circ$, $0,5^\circ$ ou 1°). Ces résolutions sont dictées par les modes de fonctionnement disponibles du télémètre laser LMS200, il n'est donc pas possible de choisir autrement. Les expériences sur le terrain martien de l'ASC ont néanmoins démontrées que les résolutions de $0,25^\circ$ et $0,5^\circ$ s'avéraient suffisantes pour détecter les obstacles de plus de 5 centimètres. Ceci répond donc à l'objectif établi en ce sens au chapitre 2.

5.3 Problèmes rencontrés

Un des problèmes que l'on observe dans certains cas sur les données acquises par le capteur se retrouve au niveau des points ambivalents (*mixed pixels*), aussi nommés points fantômes dans (Fortin, 2006). Ces points représentent un artéfact typique rencontré sur les capteurs de type lidar en général, y compris ceux qui utilisent la mesure par différence de phase ((Hebert and Krotkov, 1992), (Skrzypczynski, 2007)). En ce qui concerne plus particulièrement les télémètres laser Sick de la série que nous utilisons ici, (Skrzypczynski, 2008), (Tuley et al., 2005a), (Tuley et al., 2005b), (Matthies et al., 2003) et (Ye and Borenstein, 2002) sont des exemples d'articles qui soulignent la question des points ambivalents. Le phénomène survient du fait que le faisceau laser possède inévitablement un certain degré de divergence, donc une largeur non nulle. Lorsque le faisceau chevauche la bordure d'un objet, une partie de celui-ci est réfléchi par l'objet alors que l'autre partie atteint l'arrière-plan, générant plus d'un retour. Dans le cas où les surfaces d'avant et d'arrière-plan ne sont pas trop distantes l'une de l'autre, l'interprétation que le capteur fait de ces multiples retours résulte en des points ambivalents (figure 5.15).

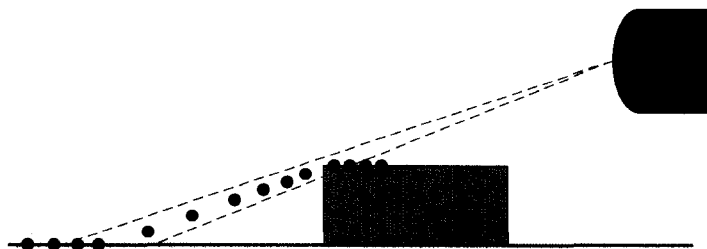


Figure 5.15: Points ambivalents

Dans le cas des lidars à mesure pulsée comme le LMS200, les points ambivalents se retrouvent toujours disposés entre l'objet d'avant-plan et son arrière-plan. Dans le cas des lidars à mesure par différence de phase par contre, la littérature rapporte que les points ambivalents peuvent aussi se trouver devant l'objet d'avant-plan ou derrière l'objet

d'arrière-plan.

Les résultats expérimentaux rapportés dans (Tuley et al., 2005a) montrent que pour le télémètre LMS200, le phénomène de points ambivalents survient lorsque les objets d'avant-plan et d'arrière-plan sont à moins de 2,5 m de distance l'un de l'autre, avec davantage d'incidence lorsque cette distance passe sous la barre de 1 m (cette distance entretient un rapport avec la longueur des impulsions laser que le capteur émet). (Tuley et al., 2005a) classe les points ambivalents observés expérimentalement sous quatre catégories et propose quelques techniques de filtrage, accompagnées des performances mesurées. (Ye and Borenstein, 2004) propose aussi des techniques de filtrage à cet effet. Bien que ces méthodes semblent fonctionner raisonnablement, à ce jour la question des points ambivalents ne s'est pas révélée comme une source d'ennuis majeurs pour l'environnement typique dans lequel le robot mobile de l'ASC évolue. L'intégration de tels filtres n'a donc pas été considérée nécessaire pour le moment.

La présence de points aberrants (*outliers*) est une autre source potentielle de tracas lors du traitement des nuages de points. L'expérience passée avec un lidar Ilris-3D (Optech) portait à croire que dans bien des cas les points aberrants étaient le résultat du passage d'un moustique devant le capteur, produisant alors un point isolé dans les airs. Ce phénomène apparaît presque inexistant avec le capteur développé ici. Il est vraisemblable que le faisceau moins concentré du télémètre laser LMS200 offre l'avantage de ne pas pouvoir détecter les moustiques. Il reste que la présence de points aberrants dans un nuage de points produit dans la plupart des cas, lors du maillage, des triangles qui présentent des caractéristiques typiques aux triangles d'ombre et/ou de frontière. Par conséquent, les processus de filtrage ont l'effet secondaire bénéfique d'éliminer du même coup ces triangles aberrants.

Au niveau du maillage, les filtres proposés pour éliminer les triangles d'ombre fonctionnent raisonnablement. Néanmoins, ils présentent tous certains seuils qui doivent être

ajustés à l'oeil pour obtenir un filtrage suffisant mais non excessif. L'obtention d'une performance optimale reste donc dans une certaine mesure subjective. Peu d'exemples relatifs à ce genre de filtres se retrouvent dans la littérature à cet effet. (Huber and Hebert, 1999) propose une méthode pour détecter les surfaces fantômes des triangles d'ombre. Leur méthode demande aussi un ajustement de seuil et peut présenter certaines erreurs, celles-ci étant plus prononcées lorsque l'angle de vue par rapport au terrain devient petit. Des recherches plus poussées sur cette question seraient souhaitables.

Finalement, il arrive que le capteur fasse une pause de quelques secondes pendant qu'il effectue un balayage. Ceci pourrait être dû à un blocage temporaire au niveau des transferts de données via TCP-IP. La machine à états finis (figure 4.3) du micro-contrôleur attend alors après la confirmation de la console client avant de poursuivre les mesures. Une analyse plus approfondie sera nécessaire sur le sujet.

CONCLUSION

La navigation autonome d'un robot mobile exige que le robot soit muni d'un ou plusieurs capteurs qui lui permettent de détecter et d'interpréter son environnement. Puisque cette source d'information alimente le(les) algorithme(s) de navigation, il s'agit d'une étape primordiale au niveau du système. Dans l'état actuel des choses, la technologie lidar représente une option incontournable lorsqu'on envisage un système capable de capter en détail l'environnement tri-dimensionnel d'un robot. Divers capteurs lidars sont disponibles d'emblée sur le marché. Malheureusement, parmi les lidars 3D disponibles, peu ou pas sont conçus à la base pour des applications robotiques. Bien que rapides, précis et dotés de longues portées, ceux-ci sont souvent trop dispendieux, lourds et énergivores pour constituer une solution idéale.

Une alternative populaire consiste à prendre un lidar 2D, i.e. qui prend des mesures sur un seul axe, et de l'installer sur un pivot motorisé. Ce pivot procure alors le second axe de balayage nécessaire à l'obtention d'un lidar 3D. Le capteur plus modeste qui en résulte présente alors des caractéristiques mieux adaptés aux contraintes de la robotique mobile. Après avoir fait l'expérience d'un lidar 3D commercial, le groupe de recherche en robotique de l'Agence spatiale canadienne a décidé de pencher vers cette approche alternative. Ce mémoire présente le capteur développé à cette fin, baptisé FCL (*Full Coverage Lidar*), de même que les algorithmes qui manipulent les données mesurées de façon à alimenter l'infrastructure de navigation autonome en place. Ce dernier satisfait les exigences établies au chapitre 2.

Le capteur développé à partir de composants disponibles commercialement reste simple et abordable. La couverture complète qu'il offre avec son champ de vision horizontal de 360° et vertical de 180° est une caractéristique clé. Les expériences ont souligné l'avantage de pouvoir ainsi obtenir une représentation tri-dimensionnelle complète de

l'environnement du robot à l'aide d'un seul balayage. Bien que la précision des mesures soit moindre que ce que l'on obtient généralement avec un capteur lidar 3D de plus haut calibre, la performance du FCL reste amplement suffisante pour détecter les obstacles dont la taille fait 5 cm ou plus. Ce critère convient à la plate-forme robotique présente de l'ASC basée sur un Pioneer P2-AT, un robot de taille modeste. Une masse et une puissance réduites minimisent les contraintes mécaniques et électriques pour la plate-forme. Comme le capteur est utilisé à moins d'un mètre du sol, sa plage de l'ordre des 32 mètres se révèle très adéquate pour les algorithmes de navigation autonome utilisés par l'ASC. Côté connectivité, outre l'alimentation électrique, l'accès au capteur passe par un seul et unique lien TCP-IP. Cette modularité physique procure beaucoup de flexibilité quant à son intégration à l'infrastructure de communication. En ce qui a trait au logiciel, le traitement des points 3D acquis par le capteur permet de reproduire de façon fiable les surfaces qu'ils représentent à l'aide d'un maillage triangulaire. Les algorithmes de filtrage développés parviennent ensuite à éliminer la très grande majorité des triangles indésirables, artefacts de l'algorithme de maillage. La structure de données qui en résulte représente fidèlement les environnements tri-dimensionnels structurés ou non, incluant des topologies géologiques concaves tel des surplombs et des grottes. Le capteur est donc bien adapté au contexte d'exploration planétaire visé.

Suite aux succès expérimentaux obtenus avec le capteur FCL développé, un second exemplaire est en voie d'être assemblé. Cette seconde itération connaîtra quelques améliorations mineures du point de vue matériel. Par exemple, un mécanisme de détection d'origine plus fiable sera utilisé sur la plate-forme rotative et un télémètre LMS291 remplacera le LMS200, le modèle 291 étant une version très similaire, mais mieux adaptée aux conditions extérieures que le LMS200.

Du point de vue logiciel, quelques travaux seront menés afin de tenter d'accélérer le processus de balayage et de transfert des données vers la console client. Certaines limites physiques contribuent en grande partie au temps que prend un balayage, comme

par exemple la vitesse maximale du port de communication RS-232 entre le télémètre et le micro-contrôleur. Néanmoins, quelques points susceptibles d'être optimisés ont été identifiés. Par exemple, un délai de stabilisation programmé dans le moteur de la plate-forme rotative peut probablement être réduit. Le recours à une mémoire tampon sur le micro-contrôleur pour découpler l'acquisition des données du transfert à la console client pourrait permettre de chevaucher les deux opérations, réduisant le temps total d'exécution. Il se pourrait aussi que la taille des transferts sur le lien réseau puisse être optimisée, ce qui accélérerait la communication entre le capteur et la console client. L'exécution du maillage sur les données au fur et à mesure qu'elles parviennent à la console client est une autre suggestion susceptible de retrancher quelques dizaines de secondes au processus global. Des études un peu plus approfondies devront être conduites pour déterminer quelles améliorations valent la peine d'être implantées. Vraisemblablement, il y a possiblement matière à accélérer le processus de balayage et de traitement des données de l'ordre de 10 à 25%.

Pour une accélération beaucoup plus substantielle du système, le recours au lien de communication RS-422 du télémètre serait l'option à envisager. Il serait alors possible d'obtenir les mesures du télémètre en temps réel à 500kbits/sec. Une telle architecture demande par contre un effort de développement beaucoup plus important au niveau de la gestion des liens de communication et de la synchronisation des mesures avec la rotation de la plate-forme. (Lamon et al., 2006), (Wagner, 2006) et (Wagner, 2007) ont eu recours à cette approche. Des vitesses de balayage de l'ordre de quelques secondes sont avancées par ceux-ci, d'où l'intérêt de considérer cette approche dans le futur.

Côté traitement des données sur la console client, la géométrie du capteur génère invariablement des ensembles de données à résolution variable. Alors que la densité de points sera énorme dans l'environnement immédiat du capteur, celle-ci décroît rapidement avec la distance. Ceci représente dans la plupart des cas une situation moins qu'idéale pour les algorithmes existants qui utilisent ces données. L'idée d'interpoler les points éloignés

et/ou de décimer davantage les points proches pourrait alléger le problème.

Finalement, l'implantation d'un mode de balayage continu a été suggéré. Le capteur balaierait alors de gauche à droite en va-et-vient à vitesse constante. Les données moins denses retournées en continu à la console client pourraient être utilisées par le robot pendant ses déplacements pour faire de la détection d'obstacles ou même de la cartographie cumulative continue. Des questions non-triviales de synchronisation des données en résulteraient, mais puisque ceci a déjà été réalisé par d'autres équipes, ce mode reste une option envisageable fort intéressante.

RÉFÉRENCES

Anthes, J. P., Garcia, P., Pierce, J. T., and Dressendorfer, P. V. (1993). Nonscanned ladar imaging and applications. In Kamerman, G. W. and Keicher, W. E., editors, *Applied Laser Radar Technology*, volume 1936, Orlando, FL, USA, pages 11–22. SPIE.

Argall, P. and Sica, R. (2002). *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, chapter LIDAR/Atmospheric sounding introduction, pages 1169–1176. Elsevier Science Ltd. editor: J. Holton and J. Pyle and J. Curry.

Astolfi, A. (1999). Exponential stabilization of a wheeled mobile robot via discontinuous control. *ASME Journal of dynamic systems measurement and control*, **121**(1), 121–126.

Bakambu, J. N., Polotski, V., and Cohen, P. (2004). Autonomous system for exploration and navigation in drift networks. In *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 212–217.

Baker, C., Morris, A. C., Ferguson, D., Thayer, S., Whittaker, C., Omohundro, Z., Reverte, C., Whittaker, W. R. L., Haehnel, D., and Thrun, S. (2004). A campaign in autonomous mine mapping. In *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 2, pages 2004–2009.

Bergh, C. F., Kennedy, B. A., Matthies, L. H., and Johnson, A. E. (2000). A compact, low power two-axis scanning laser rangefinder for mobile robots. In *Seventh mechatronics forum international conference*, Atlanta, Georgia.

Brenneke, C., Wuif, O., and Wagner, B. (2003). Using 3d laser range data for slam in outdoor environments. In *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 1, Las Vegas, Nevada, pages 188–193.

Broten, G. and Collier, J. (2006). Continuous motion, outdoor, $2\frac{1}{2}$ d grid map generation using an inexpensive nodding 2-d laser rangefinder. In *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, Florida, pages 4240–4245.

Campbell, R. J. and Flynn, P. J. (2001). A survey of free-form object representation and recognition techniques. *Computer Vision and Image Understanding*, **81**(2), 166–210.

Dijkstra, E. W. (1959). *Numerische Mathematik*, volume 1, chapter A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, pages 269–271.

Dupuis, É., Allard, P., Bakambu, J., Lamarche, T., and Zhu, W.-H. (2004). Towards autonomous long-range navigation. In *8th ESA Workshop on Advanced Technologies for Robotics and Automation 'ASTRA 2004'*, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.

Dupuis, E., Allard, P., Bakambu, J., Lamarche, T., Zhu, W.-H., and Rekleitis, I. (2005). Towards autonomous long-range navigation. In *Proceedings of ISAIRAS 2005*, Munich, Germany.

Dupuis, E., Nsasi-Bakambu, J., Rekleitis, I., Bedwani, J.-L., Gemme, S., and Rivest-Caissy, J.-P. (2006). Autonomous long range navigation - experimental results. In *9th ESA workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation*, Noordwijk, The Netherlands.

Dupuis, E., Rekleitis, I., and Bedwani, J.-L. (2008). Over-the-horizon autonomous rover navigation - experimental results. In *9th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, Los Angeles, California.

Foessel, A. (2002). *Scene Modeling from motion-free radar sensing*. PhD thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 15213.

Fong, T., Allan, M., Bouyssounouse, X., Bualat, M. G., Deans, M. C., Edwards, L., Flückiger, L., Keely, L., Lee, S. Y., Lees, D., To, V., , and Utz, H. (2008). Robotic site

survey at haughton crater. In *9th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (iSAIRAS)*, Los Angeles.

Fortin, A. (2006). Représentation étendue de scènes combinant des primitives intrinsèques géométriques et photométriques. Master's thesis, École Polytechnique de Montréal.

Fowler, R. J. and Little, J. J. (1979). Automatic extraction of irregular network digital terrain models. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, **13**(2), 199–207.

Gemme, S. (2006). Recalage automatique de géométries de maillages surfaciques dans un environnement spatial réel. Master's thesis, École Polytechnique de Montréal.

Gerbaud, T. (2004). Reconstruction tridimensionnelle et exploration autonome d'environnements non structurés. Master's thesis, École Polytechnique de Montréal.

Goldberg, S. B., Maimone, M. W., and Matthies, L. (2002). Stereo vision and rover navigation software for planetary exploration. In *IEEE Aerospace conference proceedings*, volume 5, Big Sky, Montana.

Hebert, M. (2000). Active and passive range sensing for robotics. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '00)*, volume 1, pages 102–110.

Hebert, M. and Krotkov, E. (1992). 3d measurements from imaging laser radars: How good are they? *Image and Vision Computing*, **10**, 170–178.

Huber, D. and Hebert, M. (1999). A new approach to 3-d terrain mapping. In *Proceedings of the 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems (IROS '99)*, volume 2, Kyongju, South Korea, pages 1121–1127.

Iddan, G. and Yahav, G. (1994). 3d imaging in the studio (and elsewhere...). *SPIE*, **4298**, 48–55.

Kelly, A., Stentz, A., Amidi, O., Bode, M., Bradley, D., Diaz-Calderon, A., Happold, M., Herman, H., Mandelbaum, R., Pilarski, T., Rander, P., Thayer, S., Vallidis, N., and Warner, R. (2006). Toward reliable off road autonomous vehicles operating in challenging environments. *International Journal of Robotics Research*, **25**(5-6), 449–483.

Kitware (2008). The visualization toolkit (vtk). <http://www.vtk.org/>.

Lamon, P., Kolski, S., Triebel, R., Siegwart, R., and Burgard, W. (2006). The smarter for elrob 2006, a vehicle for fully autonomous navigation and mapping in outdoor environments. Technical report, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne and Albert-Ludwigs-University of Freiburg.

Leach, G. (1992). Improving worst-case optimal Delaunay triangulation algorithms. In *4th Canadian Conference on Computational Geometry*.

Matijevic, J. and Shirley, D. (1997). The mission and operation of the mars pathfinder microrover. *Control Engineering Practice*, **5**(6), 827–835.

Matthies, L., Bergh, C., Castano, A., Macedo, J., and Manduchi, R. (2003). Obstacle detection in foliage with ladar and radar. In *In Proc. International Symposium on Robotic Research 2003 (ISRR2003)*.

Mellon, C. (2008). Red team web site. <http://www.redteamracing.org/>.

Mirallès, F. (2007). *Système de vision pour la cartographie tridimensionnelle de précision de structures sous-marines*. PhD thesis, École Polytechnique de Montréal.

Nüchter, A., Wulf, O., Lingemann, K., Hertzberg, J., Wagner, B., and Surmann, H. (2005). 3d mapping with semantic knowledge. In *Proceedings of the Robocup International Symposium 2005*.

Nilsson, N. J. (1986). *Principles of Artificial Intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers.

Nsasi Bakambu, J., Allard, P., and Dupuis, E. (2005). 3D reconstruction of environments for planetary rover autonomous navigation. In *International Symposium on Robotics*, Tokyo, Japan.

Nsasi Bakambu, J., Allard, P., and Dupuis, E. (2006a). 3D map building for planetary rover localization and path planning. In *8th International IFAC Symposium on Robots Control*, Bologna, Italy.

Nsasi Bakambu, J., Allard, P., and Dupuis, E. (2006b). 3D terrain modeling for rover localization and navigation. In *In Proc. of Second Canadian Conference on Computer and Robot Vision*, Quebec City, Quebec, Canada.

Nsasi Bakambu, J., Gemme, S., Allard, P., Lamarche, T., Rekleitis, I., and Dupuis, E. (2006c). 3D reconstruction of environments for tele-operation of planetary rover. In *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, USA.

Nsasi Bakambu, J., Gemme, S., and Dupuis, E. (2006d). Rover localization through 3D terrain registration in natural environments. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China.

Nüchter, A., Lingemann, K., Hertzberg, J., and Surmann, H. (2005). 6d slam with approximate data association. In *Proceedings of 12th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, pages 242–249.

Oggier, T., Lehmann, M., Kaufmann, R., Schweizer, M., Richter, M., Metzler, P., Lang, G., Lustenberger, F., and Blanc, N. (2004). An all-solid-state optical range camera for 3d real-time imaging with sub-centimeter depth resolution (swissranger). In *Proceedings of the SPIE -Optical Design and Engineering*, volume 5249 of Presented at the

Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, pages 534–545.

Pfaff, P. and Burgard, W. (2005). An efficient extension of elevation maps for outdoor terrain mapping. In *5th International Conference on Field and Service Robotics*, Port Douglas, QLD, Australia, pages 165–176.

Pfaff, P., Triebel, R., and Burgard, W. (2007). An efficient extension to elevation maps for outdoor terrain mapping and loop closing. *International Journal of Robotics Research*, **26**(2), 217–230.

POB (2007). 2007 3d laser scanner hardware and software survey. <http://laser.jadaproductions.net/hardware/default.php>. POB (Point Of Beginning) online.

Rekleitis, I., Bedwani, J.-L., and Dupuis, E. (2007a). Over-the-horizon, autonomous navigation for planetary exploration. In *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, San Diego, California, USA, pages 2248–2255.

Rekleitis, I., Bedwani, J.-L., and Dupuis, E. (2008). Autonomous planetary exploration using lidar data. In *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, page (submitted).

Rekleitis, I., Bedwani, J.-L., Gemme, S., Lamarche, T., and Dupuis, E. (2007b). Terrain modelling for planetary exploration. In *Fourth Canadian Conference on Computer and Robot Vision*, Montreal, QC.

Runciman, N., Rispin, M., and Newson, G. (2001). Tele-operated shotcrete spraying with the meycro robojet logica. In *6th International Symposium on Mine Mechanization and Automation*, South African Institute of Mining and Metallurgy, pages 110–116.

SICK (2003). *Telegrams for Operating/Configuring the LMS 2xx Laser Measurement Systems, Firmware version V2.10/X1.14*. SICK AG, Germany.

SICK (2006). *LMS200/211/221/291 Laser Measurement Systems Technical Description*. SICK AG, Germany.

Skrzypczynski, P. (2007). Analysis and correction of qualitative errors in 2d laser scanner readings. In *16th International Symposium on Measurement and Control in Robotics*, Warsaw, pages 203–214.

Skrzypczynski, P. (2008). How to recognize and remove qualitative errors in time-of-flight laser range measurements. In *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Nice, France.

Surmann, H., Lingemann, K., Nüchter, A., and Hertzberg, J. (2001). A 3d laser range finder for autonomous mobile robots. In *Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics*, pages 153–158.

Thrun, S., Hähnel, D., Ferguson, D., Montemerlo, M., Triebel, R., Burgard, W., Baker, C., Omohundro, Z., Thayer, S., and Whittaker, W. (2003). A system for volumetric robotic mapping of abandoned mines. In *Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.

Thrun, S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., Stavens, D., Aron, A., Diebel, J., Fong, P., Gale, J., Halpenny, M., Hoffmann, G., Lau, K., Oakley, C., Palatucci, M., Pratt, V., Stang, P., Strohband, S., Dupont, C., Jendrossek, L.-E., Koelen, C., Markey, C., Rummel, C., van Niekerk, J., Jensen, E., Alessandrini, P., Bradski, G., Davies, B., Ettinger, S., Kaehler, A., Nefian, A., and Mahoney, P. (2006). Stanley: The robot that won the darpa grand challenge. *Journal of Field Robotics*, **23**(9), 661–692.

Triebel, R., Pfaff, P., and Burgard, W. (2006). Multi level surface maps for outdoor terrain mapping and loop closing. In *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006)*.

Tuley, J., Vandapel, N., and Hebert, M. (2005a). Analysis and removal of artifacts in 3-d ladar data. Technical Report CMU-RI-TR-04-44, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 15213.

Tuley, J., Vandapel, N., and Hebert, M. (2005b). Analysis and removal of artifacts in 3-d ladar data. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, pages 2215–2222.

Urmson, C., Ragusa, C., Ray, D., Anhalt, J., Bartz, D., Galatali, T., Gutierrez, A., Johnston, J., Harbaugh, S., Kato, H. Y., Messner, W., Miller, N., Peterson, K., Smith, B., Snider, J., Spiker, S., Ziglar, J., Whittaker, W. R., Clark, M., Koon, P., Mosher, A., and Struble, J. (2006). A robust approach to high-speed navigation for unrehearsed desert terrain. *Journal of Field Robotics*, **23**(8), 467–508.

Vago, J. L. (2004). Overview of exomars mission preparation. In *8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation*, Noordwijk, The Netherlands.

Velodyne (2008). *HDL-64E User's manual*. Velodyne, 345 Digital Drive Morgan Hill, CA, 95037.

Volpe, R. (2005). Rover technology development and mission infusion beyond mer. In *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, Montana.

Wagner, B. (2006). Elrob 2006 technical paper. Technical report, University of Hannover, Institute for Systems Engineering, Real Time Systems Group.

Wagner, B. (2007). C-elrob 2007 technical paper. Technical report, Leibniz Universität Hannover, Institute for Systems Engineering, Real Time Systems Group.

Weingarten, J. W., Gruener, G., and Siegwart, R. (2004). Probabilistic plane fitting in 3d and an application to robotic mapping. In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 1, pages 927–932.

Weitkamp, C. (2005). *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*, volume 102 of *Springer series in optical sciences*. Springer Science+Business Media.

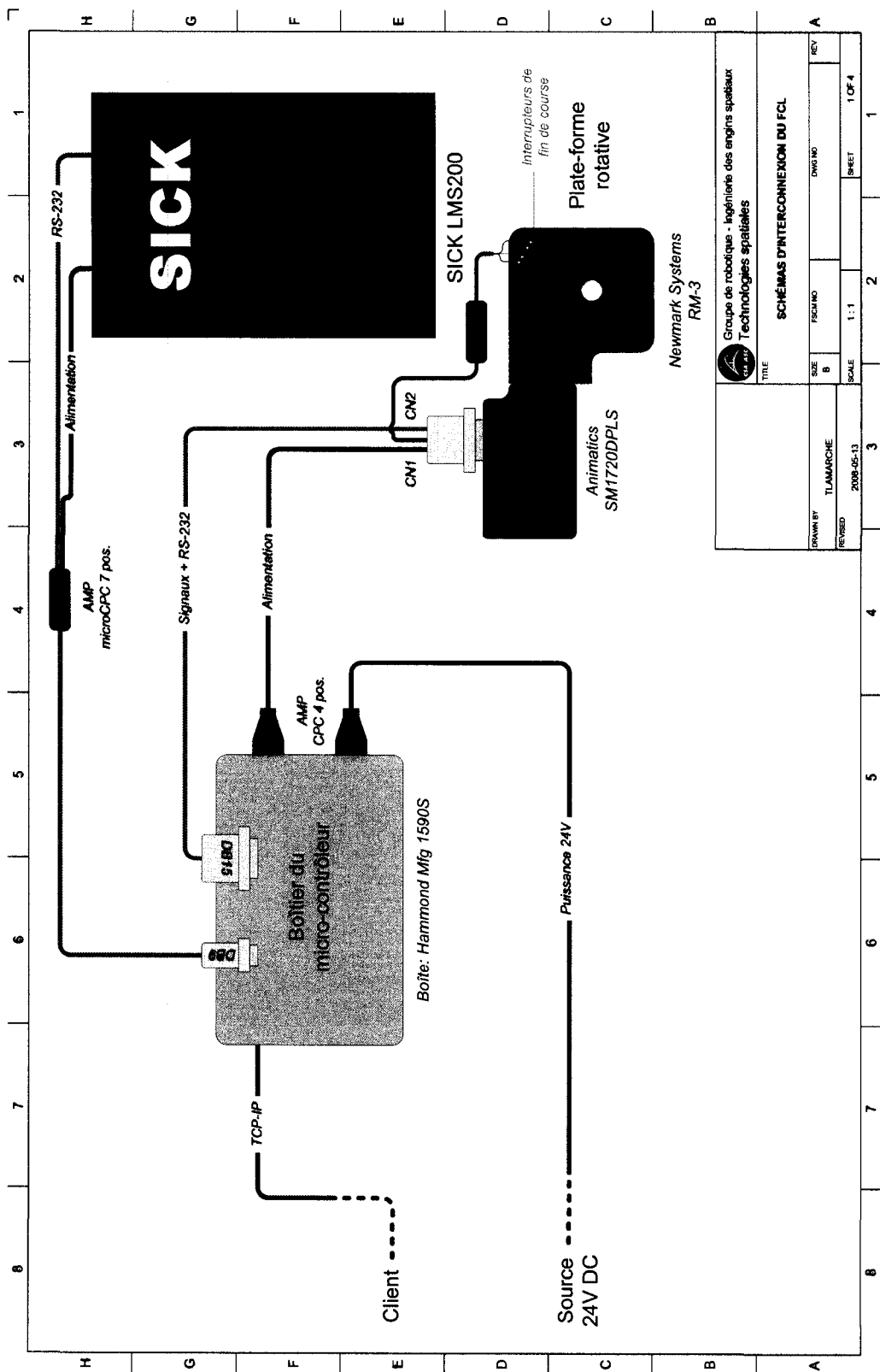
Wikipedia (2007). Moon landing — wikipedia, the free encyclopedia. [Online; accessed 16-Nov-2007].

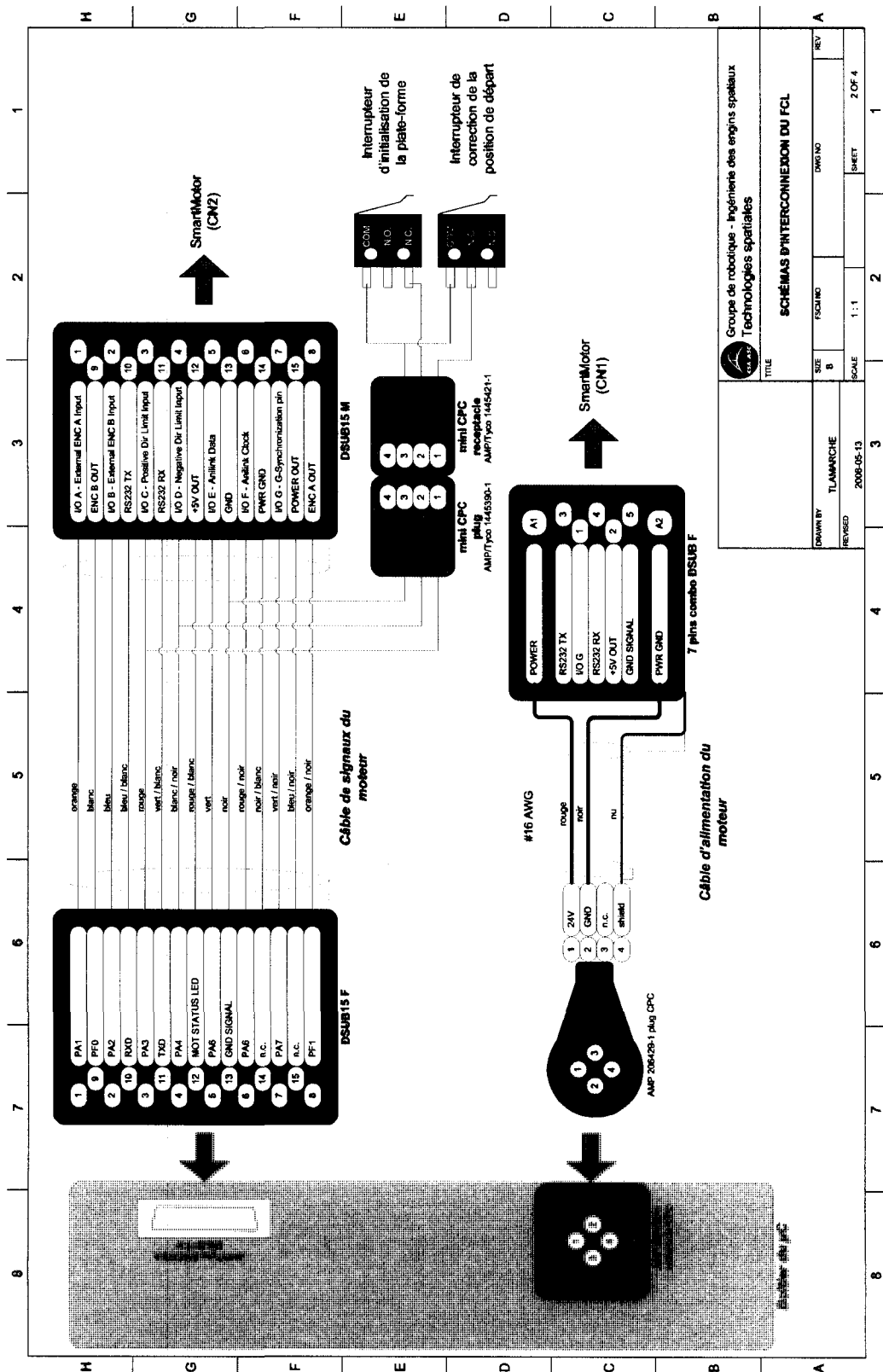
Wikipedia (2008). Delaunay triangulation — wikipedia, the free encyclopedia. [Online; accessed 20-May-2008].

Ye, C. and Borenstein, J. (2002). Characterization of a 2-d laser scanner for mobile robot obstacle negotiation. In *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, pages 2512–2518.

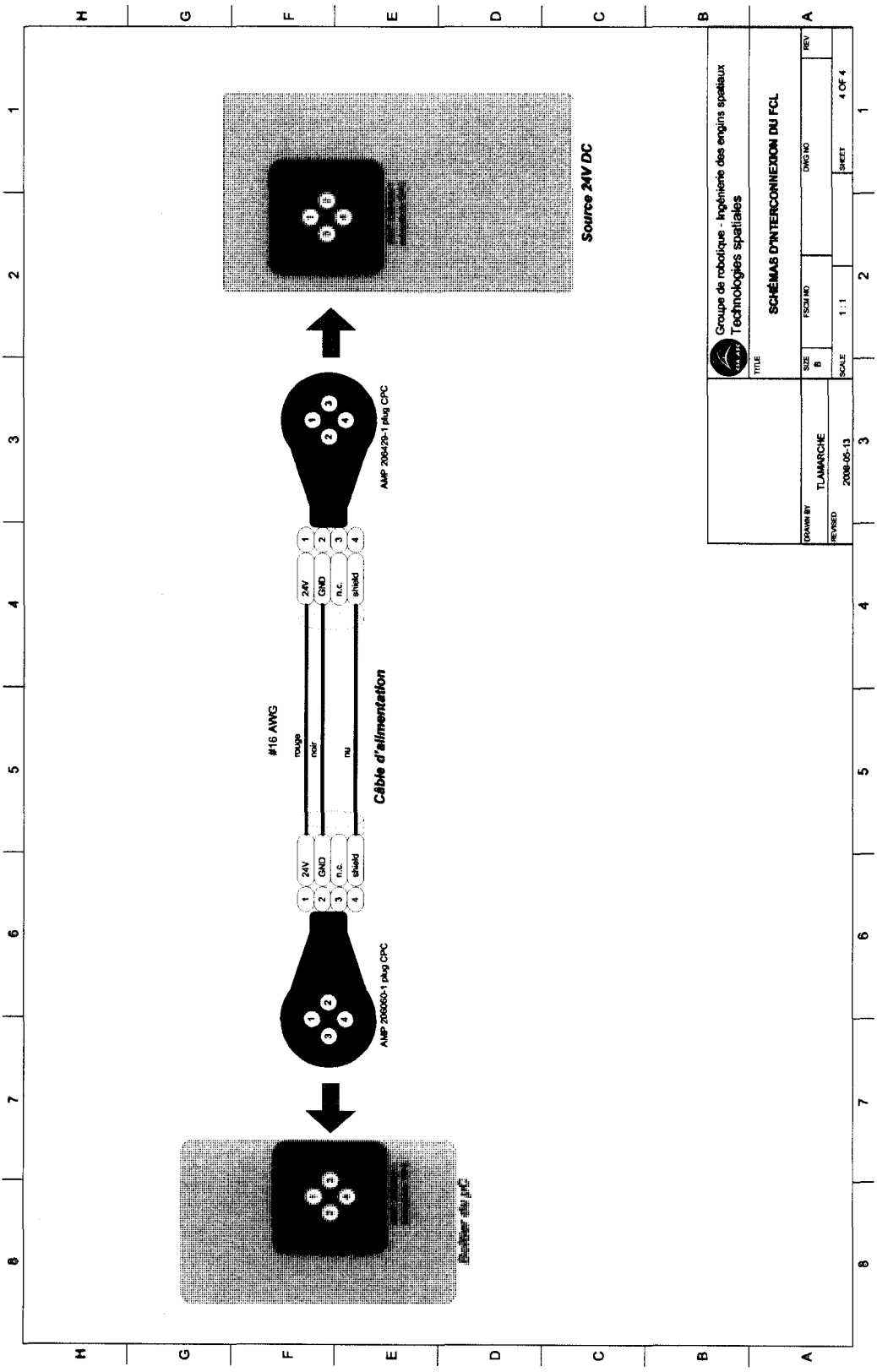
Ye, C. and Borenstein, J. (2004). A novel filter for terrain mapping with laser rangefinders. *IEEE Transactions on Robotics*, **20**(5), 913–923.

ANNEXE I**SCHÉMAS D'INTERCONNEXIONS**









Groupe de robotique - Ingénierie des engins spatiaux Technologies spatiales		SCHEMAS D'INTERCONNECTION DU FCL	
DESIGNED BY	TLAMARCHE	SIZE	B
REVISED	2008-05-13	SCALE	1:1
		FIG. NO.	ENG. NO.
		SHEET 4 OF 4	